



ХОЛОЭКСПО 2025

Предварительная программа с аннотациями

от 04.06.2025

возможны изменения

Содержание

Спонсоры и партнеры.....	4
Программный комитет.....	5
Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий».....	7
Секция 1 Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы	10
Устные доклады	10
Стендовые доклады	14
Секция 2 Оптика лазерных пучков и структурированного света	15
Устные доклады	15
Стендовые доклады	17
Секция 3 Системы визуализации и отображения информации для AR/VR	20
Устные доклады	20
Стендовые доклады	22
Секция 4 Оптические защитные технологии	23
Устные доклады	23
Секция 5 Интегральная фотоника	25
Устные доклады	25
Секция 6 Интерферометрия и оптическая метрология.....	29
Устные доклады	29
Стендовые доклады	31
Секция 7 Квантовые оптические технологии.....	32
Устные доклады	32
Стендовые доклады	37
Секция 8 Технологии микро- и наноструктурирования.....	41
Устные доклады	41
Стендовые доклады	43
Секция 9 Цифровая голография и методы визуализации	45
Устные доклады	45
Стендовые доклады	47
Секция 10 Современные функциональные оптические материалы	48
Устные доклады	48
Стендовые доклады	52
Секция 11 Биофотоника	56
Устные доклады	56
Стендовые доклады	62
Секция 12 Оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации	65
Устные доклады	65
Стендовые доклады	65

Секция 13 Новые прикладные оптические технологии	67
Устные доклады	67
Секция 14 Нейросетевые технологии в фотонике	71
Устные доклады	71
Архитектура программы	74

Спонсоры и партнеры

Платиновый спонсор

АО «НПО «КРИПТЕН»

Бронзовые спонсоры

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

ООО «ХолоГрэйт»

Спонсоры

ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС»

Партнеры

АО «НПО «ГИПО»

ООО «Альянс Оптических Систем»

ООО «Оптико-голографические приборы»

ООО «ЦЕНТР КОМПЬЮТЕРНОЙ ГОЛОГРАФИИ»

Информационные партнеры

Лазерная ассоциация

Оптическое общество имени Д. С. Рождественского

Научно—техническое издание «Оптический журнал»

Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана»

Журнал «Фотоника»

Журнал «Мир техники кино»

«Голографика»

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Программный комитет

Председатель программного комитета **Венедиктов Владимир Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Грейсух Григорий Исаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

Танин Леонид Викторович, Почетный член программного комитета, доктор физико-математических наук, академик Международной инженерной академии (МИА), член Совета президентов МИА, главный советник ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Беларусь

Павлычева Надежда Константиновна, Почетный член программного комитета, доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия.

Барышников Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, директор НИИ РЛ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Вишняков Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия.

Голубева Татьяна Юрьевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

Демин Виктор Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, первый проректор Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия.

Драчев Владимир Прокопьевич, доктор физико-математических наук, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия.

Захаров Юрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, преподаватель медицины Гарвардской медицинской школы, Старший научный сотрудник BIDMC Центра передовой биомедицинской визуализации и фотоники, Гарвардский университет, Бостон, США

Злоказов Евгений Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва, Россия.

Кайтуков Чермен Борисович, научный консультант АО «НТЦ «АТЛАС», Москва, Россия.

Ковалев Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший научный сотрудник ОКРФ Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Корольков Виктор Павлович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия.

Коротаев Валерий Викторович, доктор технических наук, профессор Университета ИТМО, главный редактор Оптического журнала, Санкт-Петербург, Россия.

Котляр Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессору кафедры технической кибернетики СГАУ, заведующему лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН, Самара, Россия

Кудряшов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины, Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий, Отделение квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова, Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Москва, Россия.

Кутлюяров Руслан Владимирович, кандидат технических наук, директор Школы перспективных исследований и технологий фотоники Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Россия

Лукин Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОА СО РАН, Томск, Россия.

Никоноров Николай Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Петров Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

Петров Николай Владимирович, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории цифровой и изобразительной голографии, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Путилин Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самарский аэрокосмический университет имени С. П. Королева, Самара, Россия.

Соломашенко Артём Борисович, научный сотрудник, руководитель Лаборатории «Голография и волноводная оптика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Страупе Станислав Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Квантовой электроники, Отделение радиофизики, Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова.

Тучин Валерий Викторович, член-корреспондент РАН, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой оптики и биофотоники, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия.

Шамрай Александр Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой электроники Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий»

П.1 Формирование, передача и обработка оптических вихрей на фотонных интегральных схемах

Любобытов Владимир Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Теоретически и экспериментально показываются различные подходы к реализации формирования, распространения и (де)мультиплексирования вихревых световых мод средствами интегральной фотоники. Изначально на основе известного подхода к излучению/детектированию оптических вихрей перпендикулярно плоскости чипа продемонстрирована возможность одновременного (де)мультиплексирования по орбитальному угловому моменту (ОУМ) и длине волны с использованием интегральных устройств, излучающих вихревые пучки с перестройкой по длине волны (на основе МЭМС-фильтров, а также обедненного рп-перехода). В качестве альтернативного подхода, был впервые теоретически доказан и экспериментально подтвержден новый подход к передаче вихревых мод в плоскости фотонной интегральной схемы, что прокладывает путь к обработке света, переносящего ОУМ, полностью на чипе для различных приложений.

Ключевые слова: Оптический вихрь, орбитальный угловой момент, оптические волноводы, волноводные решетки, мультиплексирование с модовым разделением, интегральная фотоника

П.2 Фотоника и оптоэлектроника на основе галогенидных перовскитов

Макаров Сергей Владимирович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией гибридной нанофотоники и оптоэлектроники

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

П.3 Интегральные устройства на платформе КНИ

Драчев Владимир Прокопьевич, д. ф.-м. н., профессор и директор Центра Инженерной Физики, Сколковский Институт Науки и Технологии, Москва, Россия

П.4 Нано- и микроструктуры для сверхбыстрого управления спинами с помощью лазерных импульсов

В.И. Белотелов^{1,2}, доктор физико-математических наук

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

Обратные магнитооптические эффекты такие, как обратный эффект Фарадея, позволяют нетермически воздействовать на спины магнитных материалов, вызывать их прецессию, возбуждать спиновые волны. Однако эффективность такого взаимодействия мала. Её можно значительно увеличить с помощью специальных нано- и микроструктур, в которых лазерные импульсы возбуждают различные оптические моды, благодаря которым оптическое излучение локализуется в области магнитного материала, и эффективность воздействия заметно возрастает. Наряду с этим, возникают новые оптомагнитные

эффекты, которые отсутствуют для однородных образцов. Аналогичным образом можно увеличить и воздействие терагерцовых импульсов на спины.

Ключевые слова: нанопотоника, сверхбыстрый магнетизм, оптомагнетика

П.5 Цифровая голография частиц и методы повышения ее эффективности в различных классах задач

Дёмин Виктор Валентинович, к.ф.-м.н., первый проректор, зав. лаб

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Рассматриваются возможности цифровой голографии частиц, обусловленные свойствами регистрируемых частиц и параметрами используемой схемы и аппаратуры, методы извлечения информации из цифровых голограмм о размерах, формах, координатах, динамике частиц, их распознавания. Предложена математическая модель оптической схемы двухэтапного процесса получения изображения частиц в осевой цифровой голограмме, существенно (до 1-2%) повышающая точность определения размеров и координат частиц. Разработаны несколько вариантов цифровой голографической камеры для натурных исследований планктона при мониторинге экологического состояния акватории, а также для голографического исследования оптических материалов. Приведены результаты экспедиционных исследований планктона в Карском, Баренцевом, Черном морях, озере Байкал, а также голографического исследования объемных дефектов и оптического пробоя в кристалле ZnGeP₂

Ключевые слова: цифровая голография частиц, подводная голография планктона, голографические исследования оптических материалов, методы извлечения информации

П.6 Тенденции в развитии сенсibilизаторов фотополимерных материалов

Шелковников Владимир Владимирович, д. х. н., руководитель лаборатории

Новосибирский институт органической химии им. акад. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

П.7 Технологии интегральной фотоники от видимого до среднего ИК-диапазона

Родионов Илья Анатольевич, к. т.н., директор совместного НОЦ ФМН МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП "ВНИИА"

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

П.8 Оптические квантовые вычисления в дискретных переменных

Вашукевич Евгений Александрович, к.ф.-м.н., доцент, В.А. Леонов, Р. Сурмай, Е.Н. Башмакова, Т.Ю. Голубева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен современному состоянию исследований в области квантовых вычислений в дискретных переменных. Основной акцент будет сделан на оптических квантовых вычислителях и

симуляторах. При этом будут теоретически рассмотрены преимущества и недостатки использования фотонов в качестве носителей информации, а также продемонстрированы модели вычислений не только с использованием бинарной логики (кубитов), но и на системах более высокой размерности (кудитах). Будет проведен подробный анализ существующих экспериментальных реализаций, а также затронут вопрос области их применимости для решения сложных вычислительных задач.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовая информатика, оптические кубиты, оптические кудиты, логические вентили

П.9 Мультимодовые сжатые состояния света

Шарапова Полина Родионовна, к.ф.-м.н., *руководитель научной группы*

Российский квантовый центр, Москва, Россия

П.10 Голографическое TV и 3D дополненная реальность

Шойдин Сергей Александрович, д. ф.-м. н., доцент

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Показаны пути и основные результаты создания систем голографического TV и 3D дополненной реальности. Видно, что все этапы исследований были впервые представлены на конференциях ГОЛОЭКСПО за последнее десятилетие. Их анализ показывает, что проблема голографического TV и 3D дополненной реальности широко воспринята научной общественностью, что вызвано возможностью использования предложенных научно — технических решений как в развитии ряда научных, так и ряда прикладных технических задач, в том числе в задачах стыковки беспилотных аппаратов в космосе и под водой или управления работами в опасных производствах. Наряду с уже реализованными этапами проекта показаны этапы, которые предстоит пройти для реализации проекта и открывающихся им новых направлений исследований.

Ключевые слова: Голография, Передача информации, Дополненная реальность, Голографическое TV, Структурированный свет

Секция 1

Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы

Устные доклады

1.1 Компактное устройство для коллимации лазерного пучка для межспутниковой связи на основе дифракционных оптических элементов

Ю. В. Ханенко, Р. В. Скиданов, И. С. Пронин

Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королёва, Самара

Представлены результаты экспериментального исследования коллимации лазерного излучения на основе двух дифракционных оптических элементов: бинарного дифракционного аксикона и кольцевой дифракционной линзы. Рассматривается два эксперимента: на основе полноформатной системы и на основе системы с большим количеством внутренних отражений для уменьшения продольных габаритов коллиматора. Данная система позволяет решить две задачи: снижение расходимости лазерного пучка на 25-30% и уменьшение габаритов коллиматора до размеров достаточных для использования на спутниках формата кубсат. Приведены результаты моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: Коллимация, Лазерный пучок, Дифракционные оптические элементы, Межспутниковая связь

1.2 Метод опорных квадрик в задаче синтеза дифракционных оптических элементов в приближении скалярной теории дифракции

Д. В. Сошников^{1,2}, Л. Л. Досколович^{1,2}, А. А. Мингазов^{1,2}, Е. А. Безус^{1,2}, Д. А. Быков^{1,2}

¹ *Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия*

² *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия*

Разработан вариант метода опорных квадрик (МОК) для решения обратной задачи расчета фазовой функции дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего заданное распределение интенсивности, в рамках скалярной теории дифракции. В рамках метода фазовая функция ДОЭ представлена в параметрическом виде, соответствующем суперпозиции фазовых функций линз (квадрик). Расчет параметров квадрик основан на градиентном методе минимизации функции ошибки, представляющий отличие формируемого и требуемого распределений интенсивности в рамках скалярной теории дифракции. При этом производные функции ошибки по параметрам квадрик получены в аналитическом виде. Представленные примеры расчета ДОЭ для формирования заданных распределений интенсивности демонстрируют хорошие рабочие характеристики метода.

Ключевые слова: Дифракционный оптический элемент, Обратная Задача, Метод опорных квадрик, Приближение геометрической оптики, Скалярная теория дифракции, Градиентный метод

1.3 Метод формирования гиперспектральных слоев на основе набора изображений, сформированных матрицей гармонических линз

А. С. Пронин¹, Р. В. Скиданов¹, Г. В. Успенцев¹, С. С. Подтихова¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Рассмотрен метод формирования гиперспектральных слоев с использованием матрицы гармонических линз и фильтра Баяра обычной цветной камеры. Разработан опытный образец, проведены эксперименты. Протестированы некоторые архитектуры нейронных сетей и алгоритмы машинного обучения для метода восстановления спектра по данным матричного гиперспектрометра. Результаты структурированы, проанализированы и представлены в работе.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Гармонические линзы, Гиперспектрометр моментальной съемки

1.4 Оптические элементы для реализации логических операций в свободном пространстве

Д. М. Сорокин¹, Р. В. Скиданов¹, Г. В. Успенцев¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, Россия

Проведена методика расчета дифракционных оптических элементов, реализующих основные логические операции AND, OR и NOT в виде поступающего на вход светового сигнала в прямоугольной области и выходной области в форме линии на основе моделирования и эксперимента.

Ключевые слова: Оптика, Логические операции, Дифракционные оптические элементы, Логические элементы

1.5 Оптические линии задержки на основе дифракционных оптических элементов

С. С. Подтихова¹, Р. В. Скиданов¹, Г. В. Успенцев

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Представлена система из ДОЭ для осуществления управляемой временной задержки светового сигнала. Рассмотрены различные варианты с разным количеством пучков и разным пространственным расположением. Представлены результаты экспериментов.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы

1.6 Зависимости нагрузочной добротности от ширины волновода микрокольцевого резонатора и гар

И. О. Кузьминых¹, А. Ю. Кузин²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», департамент компьютерной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия

² Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В работе была исследована матрица чувствительных элементов сенсора газа на платформе нитрида кремния с использованием микрокольцевого резонатора размером 9 на 9 устройств, а также были построены зависимости нагруженной добротности от ширины волновода микрокольцевого резонатора и расстоянием между транспортным и резонаторным волноводом (gap). Построенные зависимости позволяют определить оптимальные параметры чувствительной части сенсора, при которых устройство сможет демонстрировать высокий уровень чувствительности к появлению примеси газа в атмосфере. Высокая добротность сенсора позволит фиксировать ультраслабые концентрации утечек газов.

Ключевые слова: Оптика, Микрокольцевой резонатор, Дифракционные оптические элементы, Водород

1.7 Определение угловых координат точечного светящегося объекта с использованием дифракционных оптических элементов

А. Е. Морозов¹, Р. В. Скиданов¹, А. С. Пронин¹, Д. М. Сорокин¹, Ю. В. Ханенко¹, С. А. Фомченков¹, К. В. Овчинников¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королёва, Самара, Россия

Рассмотрен метод быстрого определения угловых координат, основанный на использовании дифракционных оптических элементов, формирующих радиальное распределение интенсивности вида $|\arctg(\rho)|$. Представлены результаты моделирования и эксперимента. Показана возможность определения угловых координат с погрешностью около $0,01^\circ$.

Ключевые слова: Оптическая система, Радиальное распределение интенсивности, Дифракционные оптические элементы

1.8 Современные аддитивные технологии в оптике

Грейсху Григорий Исаевич¹, доктор технических наук, Левин И. А.², Казин С. В.¹

1 — Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза

2 — ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», г. Красногорск

В докладе представлен краткий обзор современных аддитивных технологий используемых для производства рефракционных оптических элементов со сферическими и асферическими поверхностями, а также с градиентом показателя преломления. Наиболее продвинутыми из них сегодня являются химическое осаждение из газовой фазы и 3D-струйная печать с использованием нанокompозитных материалов, получивших название «оптических чернил». Принципам построения методик проектирования объективов, включающих градиентные элементы, неоднородные материалы которой изготавливаются вышеперечисленными технологиями, уделено основное внимание настоящего доклада.

1.9 Разработка и применение цилиндрических градиентных линз в оптических системах и носимой электронике

В.С. Брунов, Г.А. Ермолаев, Д.П. Чертин, М.М. Чугунова, А.В. Арсенин, В.С. Волков

Emerging Technology Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

В работе дан ретроспективный взгляд на развитие технологии изготовления высокоапертурных градиентных линз, включающий классический метод ионообменной диффузии в стекле (объективно ограниченный по величине максимального наведённого перепада показателя преломления), а также

современный высокоразрешающий метод полимерной печати с использованием эффекта двухфотонного поглощения, позволяющий преодолеть объективные ограничения ионообменных методов. Проведена сравнительная оценка качества градиентных линз, изготовленных данными методами. Рассмотрены методы измерения и контроля оптических параметров градиентных линз, дана их сравнительная оценка. Продемонстрирован современный эллипсометрический метод измерения градиентных линз, являющийся высокоточным, эффективным, неразрушающим и низкочастотным. Рассмотрено запатентованное носимое устройство дополненной реальности на основе контактной линзы, где градиентные линзы используются в качестве коллиматоров интегрированного микродисплея.

Ключевые слова: градиентная оптика, градиентная линза, GRIN линза, ионный обмен, ионообменная диффузия, наведённое изменение показателя преломления, дополненная реальность, носимое устройство

1.10 Фокусировка супер-гауссовых пучков в ближней зоне субволновых кольцевых решеток

Д. А. Савельев

Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королёва, Самара

В данной работе определены высоты отдельных зон рельефа кольцевых решеток, при которых наблюдается формирование узкого фокального пятна (до 0,23 длин волн) и удлиненных световых фокальных отрезков на оптической оси (свыше 6 длин волн). В качестве входного излучения рассматривались гауссовы и супер гауссовы пучки с круговой и радиальной поляризацией. Также была произведена оценка особенностей формирования удлиненных световых фокальных отрезков при внесении в рассматриваемые лазерные пучки астигматической аберрации. Для численного моделирования использовался метод конечных разностей во временной области.

Ключевые слова: Субволновые кольцевые решетки, Острая фокусировка, Супер гауссовы пучки, FDTD, Астигматическая аберрация

1.11 Диэлектрическое зеркало, сохраняющее циркулярную поляризацию света в широком спектральном и угловом диапазоне

Н. С. Салахова¹, С. А. Дьяков¹, Н. А. Гиппиус¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Территория Инновационного Центра «Сколково», Большой бульвар д. 30, стр. 1, Москва 121205, Россия

В данной работе представлен дизайн полностью диэлектрического зеркала, обеспечивающего сохранение циркулярной поляризации света в широком спектральном диапазоне от 1400 до 1800 нм и при углах падения от -40° до $+40^\circ$. Зеркало состоит из фотонно-кристаллического слоя на многослойной диэлектрической структуре. Проведено численное моделирование, исследующее влияние вариаций геометрических параметров — таких как толщина слоёв, периодичность и форма профиля, возникающая при травлении — на оптические характеристики зеркала. Разработка зеркал, сохраняющих циркулярную поляризацию при отражении, имеет важное значение для создания систем детектирования и селекции энантиомеров хиральных молекул в химических и биомедицинских приложениях.

Ключевые слова: Фотонные кристаллы, циркулярно-поляризованное излучение, диэлектрические зеркала, широкополосные зеркала

1.12 Метод создания фазовых голограмм через предварительно итеративно вычисляемые функции модуляции для эффективного структурирования света

А. А. Ревякин^{1,2}, М. Д. Гервазиев^{1,2}, Д. С. Харенко^{1,2}

1 — Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2 — Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Представлен новый метод эффективной генерации структурированного излучения с использованием пространственных фазовых модуляторов света в геометрии с одним отражением. Численная оптимизация функции модуляции позволяет напрямую рассчитывать голограммы для создания произвольных распределений поля в оптической 4f-схеме. Экспериментальные результаты по генерации мод Лагерра-Гаусса показывают, что предложенный метод обеспечивает точность близкую к классическому методу на основе разложения Якоби-Ангера, при этом демонстрируя большую эффективность, достигающую 15% для первых шести мод. Кроме того, он позволяет точно контролировать фазу структурированного излучения с отклонением около 1%, а также предоставляет дополнительные возможности для генерации голограмм в зависимости от конкретных условий эксперимента.

Ключевые слова: Компьютерная голография, Дифракционные оптические элементы, Структурирование света

Стендовые доклады

С.1.1 Способ создания дифракционных оптических элементов на выпуклых поверхностях для гиперспектральной аппаратуры

С. А. Фомченков^{1,2}, Р. В. Скиданов^{1,2}

¹ НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

В работе предложен и исследован способ изготовления дифракционной решетки на выпуклой поверхности для гиперспектральной аппаратуры. Проведены экспериментальные исследования по изготовлению дифракционной решетки. Отработан и оптимизирован технологический процесс изготовления. Представлены результаты работы готового элемента в схеме гиперспектрометра.

Ключевые слова: Дифракционная решетка, напыление тонких пленок, литография, гиперспектрометр

С.1.2 Дифракционная эффективность двухслойных двухрельефных микроструктур при перепаде температур

Грейсх Григорий Исаевич¹, доктор технических наук *1 — Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза*

Секция 2

Оптика лазерных пучков и структурированного света

Устные доклады

2.1 Вопросы формирования оптических пучков и изображений в турбулентных средах: особенности параметризации неколмогоровских моделей спектра турбулентности (Приглашенный)

Лукин Владимир Петрович, доктор физико-математических наук

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Исследования по описанию распространения оптических волн в случайно-неоднородных средах, таких как атмосферная турбулентность, постоянно развивались всегда достаточно интенсивно.

В частности, теория распространения волн, развитая С.М. Рытовым, В.И. Татарским и их учениками, использовала широко применяемую модель Колмогорова-Обухова для спектра турбулентности.

В этом докладе приводятся сведения, связанные с решением задачи получения аналитических выражений для расчетов флуктуаций параметров оптических волн при их распространении в турбулентной среде с неколмогоровским спектром турбулентности.

Ключевые слова: распространение оптических волн, турбулентность, модели спектра

2.2 Название обновляется (Приглашенный)

В. Ю. Венедиктов, доктор физико-математических наук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

2.3 Геометрия траекторий структурированных пучков Лагерра—Гаусса на орбитальной сфере Пуанкаре: экспериментальный подход (онлайн)

М. В. Брецько¹, Я. Е. Акимова¹, А. В. Воляр¹

¹ Физико-технический институт Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Россия

В работе исследуются характеристики структурированного света с орбитальным угловым моментом посредством отображения его состояний на орбитальную сферу Пуанкаре — геометрический аналог поляризационной сферы. Такое представление позволяет интерпретировать поведение светового пучка в виде пространственной траектории на сфере и выявлять его скрытые симметрии и инварианты к различным оптическим и физическим преобразованиям. В рамках исследования разработан и реализован метод экспериментального определения орбитальных параметров Стокса. Метод основан на регистрации распределений интенсивности структурированного пучка в двух плоскостях оптической системы и позволяет однозначно восстановить все четыре орбитальных параметра Стокса.

Ключевые слова: Структурированный свет, орбитальные параметры Стокса, орбитальная сфера Пуанкаре, орбитальный угловой момент.²

2.4 Влияние нулевого порядка дифракции на бесселевы пучки, сформированные спиральными бинарными фазовыми аксиконами

Н. Д. Осинцева¹, Н. А. Николаев²

¹ *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

В работе изучается природа образования нулевого порядка дифракции при формировании бесселевых пучков терагерцового диапазона с помощью пропускающих кремниевых спиральных бинарных фазовых аксиконов. Показано, что центр аксикона, где нарушается периодичность структуры, не вносит существенного вклада в формирование нулевого порядка дифракции в противовес выдвинутому ранее предположению, основанному на аналогичных исследованиях, представленных в литературе. Ранее было показано, что сформированные пучки содержат периодические азимутальные вариации интенсивности внутри колец. Моделирование демонстрирует, что количество максимумов в них равно $2l$ (l — топологический заряд пучка), в то время как в эксперименте наблюдается — l . Показано, что отличие обусловлено присутствием в эксперименте нулевого порядка дифракции, вызванного переотражениями волн в кремниевой пластине, не учтенными ранее в расчетах.

Ключевые слова: Бесселевы пучки, дифракционные оптические элементы, аксикон, терагерцовое излучение

2.5 Использование отражающих аксиконов для создания терагерцевых бесселевых пучков

Н.А. Баздырев^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,3}, В.С. Павельев⁴, А.Н. Агафонов⁴, К.Н. Тукмаков⁴

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

⁴ *Самарский университет, Самара, Россия*

В работе представлены результаты по формированию терагерцевых (ТГц) бесселевых пучков с топологическими зарядами $|l| = 3$ и $|l| = 9$ на длинах волн 141 мкм, 203 мкм и 218 мкм. Аксиконы с периодами $p = 2$ и 3 мм были изготовлены методами реактивно-ионного травления и лазерной абляции на кремнии с последующим напылением непрозрачного слоя меди. Определены зоны формирования бесселевых пучков, которые согласуются с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции и получены оценки энергетической эффективности отражающих аксиконов. Топологические заряды полученных бесселевых пучков были определены с использованием интерферометра Маха-Цендера.

Ключевые слова: Бесселевы пучки, Терагерцовое излучение, Отражающие аксиконы, Беспроводная передача данных, Лазер на свободных электронах

2.6 Топологические свойства мод петлевых дефектов в двумерных фотонных

Е. О. Смолина¹

¹ *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*

В работе исследуются связанные моды топологических дефектов в наноструктурированных фотонных метаповерхностях. С помощью теоретического анализа, основанного на эффективной Дираковской модели, показана топологическая устойчивость таких состояний к локальным деформациям и беспорядку. Рассмотрены прямолинейные и круглые замкнутые границы доменов, формирующие топологический дефект. Предложены реалистичные параметры метаповерхностей, при которых

наблюдение таких мод становится доступным экспериментально. Полученные результаты открывают перспективы для создания устойчивых к беспорядку и несовершенствам изготовления функциональных фотонных элементов.

Ключевые слова: Фотонные кристаллы, Топологические дефекты, Топологическая устойчивость, Интегральная фотоника, Дираковская модель.

2.7 Самовосстановление поляризационной структуры векторных пучков света при секторном возмущении (онлайн)

С. И. Якубов¹, М. В. Брецько¹, С. И. Халилов¹, Я. Е. Акимова¹, А. В. Воляр¹

¹ *Физико-технический институт Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Россия*

Целью работы было исследование влияния секторных возмущений на поляризационную структуру векторных ТЕ и ТМ мод. Для количественного анализа предложена интегральная характеристика степени восстановления поляризации, основанная на нормированных параметрах Стокса. В результате проведенного численного моделирования и экспериментальной проверки, показано, что при малых углах секторного возмущения, пучки сохраняют высокую степень восстановления поляризации и эффект самовосстановления проявляется уже на расстояниях порядка длины Рэлея. С увеличением сектора возмущения происходит частичное восстановление поляризационной структуры исходных векторных мод. Выявлено, что ТМ-мода проявляет большую локальную устойчивость, хотя интегральная степень восстановления отличается от ТЕ-моды незначительно.

Ключевые слова: Оптический вихрь, Поляризационные сингулярности, Секторное возмущение, Параметры Стокса

2.8 Преобразование поляризационной структуры векторного структурированного пучка света при астигматическом преобразовании (онлайн)

С. И. Халилов¹, М. В. Брецько¹, С. И. Якубов¹, Я. Е. Акимова¹

¹ *Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия*

Работа посвящена исследованию влияния астигматического преобразования на векторные структурированные пучки Лагерра-Гаусса при прохождении через цилиндрическую линзу. Показано, что такие пучки демонстрируют сложные изменения в своей фазовой и поляризационной структуре под действием цилиндрической линзы, что приводит к рождению, слиянию и аннигиляции поляризационных сингулярностей, включая С-точки и V-точки, а также к изменению топологии эллипсов поляризации. Результаты позволяют лучше понять устойчивость и преобразуемость векторных мод при прохождении через оптические элементы с асимметрией и могут быть полезны для управления состояниями света в современных фотонных устройствах.

Ключевые слова: Структурированный свет, ABCD-матрица, Векторные моды, Поляризационные сингулярности

Стендовые доклады

С.2.1 Фурье-модальный метод с аналитическими кусочно-непрерывными функциями для эффективного анализа дифракции на одномерных решетках с произвольными профилями

С. И. Спиридонов¹, А. А. Щербаков¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлена улучшенная формулировка Фурье-модального метода (ФММ) для случая решеток произвольного профиля, периодичных в одном направлении, являющаяся обобщением предыдущей работы авторов. Предлагаемый подход явно учитывает наклонные граничные условия для разрывной и непрерывной компонент электрического поля в каждом слое разложения профиля решетки, что приводит к новым матричным уравнениям и позволяет снизить влияние эффекта Гиббса. Результаты численных расчетов в сравнении с классическим ФММ демонстрируют значительное улучшение расчета ближнего поля структуры. Разработанный подход может найти применение в задачах поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии, нелинейной оптики и разработке сенсорных устройств.

Ключевые слова: Оптика, Фурье-модальный метод, ФММ, решетки с наклонными стенками, решетки произвольного профиля, ближнее поле, дифракционная эффективность

С.2.2 Влияние aberrаций волнового фронта на ФРТ при острой фокусировке для различных типов поляризации

П. А. Хорин¹, Н. А. Ивлиев¹, С. Н. Хонина^{1, 2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

² «Институт систем обработки изображений — Самара» КККиФ НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

Как правило, aberrации волнового фронта рассматриваются как негативный фактор, который приводит к искажениям формирования пучков или изображений. В данной работе численно исследуется влияние aberrаций волнового фронта как на отдельные компоненты электрического поля, так и на полную интенсивность векторного поля при острой фокусировке для различных типов поляризации. При моделировании использован формализм расчета поля в фокальной области в приближении Дебая. Получено, что в некоторых случаях специально внесенная aberrация может способствовать уменьшению размера светового пятна, особенно при острой фокусировке.

Ключевые слова: волновые aberrации, острая фокусировка, поляризация

С.2.3 Перестраиваемый генератор оптических вихрей на основе кубических угловых отражателей

Д. Д. Решетников¹, А. А. Рыжая², М. Е. Павелина¹, А. А. Севрюгин², А. Л. Соколов³, В. М. Петров¹, В. Ю. Венедиктов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Целью работы является разработка и экспериментальное исследование генератора скалярных оптических вихрей 1-го порядка на основе поляризационного интерферометра Маха-Цендера с кубическими угловыми отражателями. Предложена оригинальная оптическая схема такого генератора, а также результаты исследования зависимости структуры формируемых оптических пучков от относительной фазы в плечах интерферометра.

Ключевые слова: Оптика, Структурированный свет, Оптические вихри, Кубические уголкового отражатели, Поляризационный интерферометр

С.2.4 Излучающие свойства топологических дефектов в фотонных кристаллах, сформированных на кремниевых структурах с наноструктурами Ge(Si)

Е. О. Смолина¹, А. В. Перетокин², И. А. Чуприн³, М. В. Степихова², М. В. Шалеев², Е. Е. Родякина⁴, Д. В. Шенгуров², А. В. Новиков²

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

³ Высшая школа общей и прикладной физики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе рассмотрены излучающие свойства топологических дефектов в двумерных фотонных кристаллах, сформированных на кремниевых структурах с наноструктурами Ge(Si). Излучая в диапазоне прозрачности кремния (1.2 — 1.6 мкм) и будучи совместимыми с кремниевыми технологиями, такие структуры представляют значительный интерес с точки зрения возможностей создания на их основе элементов интегральной фотоники. Как будет показано в работе, формирование топологических дефектов в фотонных кристаллах позволяет управлять диаграммой направленности и поляризацией излучения активной среды, открывая тем самым новые возможности для создания источников излучения с заданными свойствами, не чувствительных к ошибкам процессирования.

Ключевые слова: Фотонные кристаллы, Топологические дефекты, Люминесценция, Интегральная фотоника.

Секция 3

Системы визуализации и отображения информации для AR/VR

Устные доклады

3.1 Нейрофизиологические и оптические аспекты восприятия AR: от конфликта к комфорту

Д.Д. Шаров¹, С.К. Стафеев^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен экспериментальный подход к исследованию вергентно-аккомодационного конфликта (ВАК), возникающего при использовании устройств дополненной реальности (AR). Авторы анализируют влияние конструктивных особенностей AR-гарнитур на зрительный комфорт пользователей, включая бинокулярное соперничество и влияние аккомодации. Описаны методики экспериментов с применением айтрекинга, ЭЭГ и адаптивной оптики. Предлагаемые технические решения позволяют моделировать различные условия визуального восприятия и учитывать индивидуальные особенности пользователей. Представленные результаты могут быть полезны при разработке эргономичных AR-систем, минимизирующих зрительное напряжение и повышающих комфорт взаимодействия с цифровым контентом.

Ключевые слова: дополненная реальность, вергентно-аккомодационный конфликт, носимые устройства дополненной реальности, визуальный комфорт, восприятие глубины.

3.2 Высокопреломляющие нанокompозитные материалы для систем дополненной реальности

(Приглашенный)

Целиков Г.И., Казанцев И.С., Ермолаев Г.А., Арсенин А.В., Волков В.С.

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai Investment Park First, Dubai, United Arab Emirates

Современные устройства дополненной реальности требуют разработки компактных оптических элементов с определенными характеристиками. Развитие технологий 3D печати сделало возможным создание таких оптических элементов как микро- и градиентные линзы из полимерных композитных сред. Миниатюризация оптических компонентов связана с синтезом полимерных нанокompозитных соединений, реализующих возможность управления показателем преломления в широком диапазоне, что в свою очередь неотделимо от создания для них новой материальной базы. В данной работе мы демонстрируем возможность лазерного синтеза наночастиц из высокопреломляющих ван-дер-ваальсовых материалов - основы нанокompозитных соединений для 3D печати оптических элементов устройств дополненной реальности. Кроме того, на примере композитной системы PMMA/MoS₂ с различной объемной концентрацией наночастиц MoS₂ показана возможность управления показателем преломления композита в диапазоне от 1.5 до 2.

Ключевые слова: наночастицы, нанокompозиты, градиентные линзы, лазерная абляция, дополненная реальность

3.3 Асимметричные схемы мультипликации выходного зрачка HMD систем

Андрей Николаевич Путилин^{1,2}, С. С. Копенкин^{1,2}, Н. А. Путилин^{1,2}, С. Е. Дубынин¹, Ю. П. Бородин^{1,2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

В работе представлено исследование по анализу схем построения, моделированию и экспериментальной записи голографических волноводных устройств мультипликации выходного зрачка для НМД (Head-Mounted-Display) дисплеев. Показаны варианты исполнения волноводного голографического перископа в зависимости от параметров формируемого виртуального изображения. Особенностью оптических схем такого типа дисплеев является использование волноводной дифракции и компенсация хроматизма дифракционных элементов. Экспериментально записывались схемы дифракционных перископов с выходным зрачком, ассиметрично мультиплицируемым по одной координате.

Ключевые слова: Волноводные голограммы, голографические оптические элементы, дисплей дополненной реальности, НМД.

3.4 Исследование аберраций в оптических схемах с волноводным распространением излучения: ограничения и возможные преимущества волноводной голографии

Николай Андреевич Путилин^{1,2}, С. Е. Дубынин¹, Н. А. Путилин^{1,2}, С. С. Копенкин^{1,2}, Ю. П. Бородин^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

В работе рассматриваются особенности возникновения аберраций в системах дополненной реальности на основе волноводных дифракционных элементов. Также анализируется возможность применения данных элементов для исследования аберраций объективов и окуляров. Целью работы является определение ограничений и преимуществ, связанных с волноводным распространением излучения. В ходе работы использовались специализированные программы для компьютерного моделирования рассматриваемых схем. Проводились экспериментальные исследования изготовленных дифракционных элементов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов контроля качества оптических компонентов или отдельных поверхностей.

Ключевые слова: Волноводная голография, Дифракционные оптические элементы, Аберрации оптических систем, Системы дополненной реальности.

3.5 Муаровые узоры для сенсоров в контактных линзах (Приглашенный)

И.М. Фрадкин, Р.В. Киртаев, М.С. Миронов, Д.В. Грудинин, А.А. Марченко, М.М. Чугунова, В.Р. Соловей, А.В. Сюй, А.А. Вишневый, И.П. Радько, А.В. Арсенин, В.С. Волков

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai Investment Park First, Dubai, United Arab Emirates

Контактные линзы, благодаря своему положению на поверхности глаза, представляют уникальную платформу для интеграции электронных и оптических устройств, применимых в технологиях виртуальной и дополненной реальности, медицинской диагностике и других областях. В случае сенсоров ключевой проблемой остается достижение высокой точности измерений при сохранении миниатюрных размеров датчиков, соблюдении жестких ограничений по энергопотреблению и обеспечении простой процедуры считывания результатов.

В данной работе предложено использование муаровых узоров, возникающих при наложении двух решеток, для преобразования микроскопических деформаций и сдвигов в макроскопические визуальные паттерны. На основе изменений формы и размеров этих узоров можно проводить измерения. Разработанный сенсор внутриглазного давления, основанный на данном принципе,

демонстрирует погрешность измерения в 2 мм рт. ст., а модуль отслеживания взгляда обеспечивает определение ориентации линзы с точностью до 0.3° благодаря эффекту параллакса. Оба решения являются пассивными, что позволяет считывать данные оптически с помощью внешней камеры и полностью исключает необходимость интеграции источников питания.

Результаты исследования подтверждают, что муаровые узоры могут стать основой для компактных сенсоров в контактных линзах, применимых как в медицинской диагностике (например, для мониторинга глаукомы), так и в технологиях виртуальной и дополненной реальности.

Ключевые слова: отслеживание глаз, внутриглазное давление, контактная линза, муаровые узоры, параллакс

3.6 Волноводные экраны и линзы, используемые в AR/VR-устройствах – современность, тенденции развития и будущее технологии

Краюшкин Николай Александрович¹, к. т. н.

¹Виртуальные Очки

Стендовые доклады

С.3.1 Сравнение схем записи голограммных зеркал для транспортных систем отображения

Ч. Янь, М. В. Шишова, П. В. Семченков, А. Б. Соломашенко

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В докладе представлено сравнение двух вариантов схем записи голограммных зеркал, которые применяются в составе проекционных систем отображения информации для транспортных средств. В работе результаты экспериментальных исследований соотносятся с результатами моделирования в Zemax.

Ключевые слова: дополненная реальность, HUD, голограммное зеркало, голограммная линза, индикатор на лобовом стекле

Секция 4

Оптические защитные технологии

Устные доклады

4.1 Название обновляется (Приглашенный)

Танин Леонид Викторович, д. ф.-м. н., академик Международной инженерной академии (МИА), член Совета президентов МИА, главный советник ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

Посвящено памяти первого президента академии наук СССР, выдающегося ученого в области люминесценции, академика Сергея Ивановича Вавилова.

4.2 Обзор способов создания визуального эффекта нанобарельеф в защитных оптических знаках (Приглашенный)

Ч. Б. Кайтуков

¹ АО НТЦ Атлас, Москва, Россия

4.3 Название обновляется (Приглашенный)

А. В. Смирнов

¹ АО НПО Криптен, Дубна, Россия

4.4 Выбор параметров защитной голограммы для неблагоприятных условий освещения

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

Защитные тисненные голограммы распространены больше других в наше время из-за высокой технологичности и дешевизны в массовом производстве. Однако, условия освещения в современной среде не слишком благоприятны для полноценного проявления всех достоинств голограммы как защитного средства. В работе проведена оценка методов создания рельефов голографических решеток для различных условий освещения и их оптических свойств. В докладе предложены две модели освещения, и они применены для оценки влияния размеров освещающего источника и его спектра на разрешение и цветность в восстанавливаемом голографическом изображении. Предложен подход для выбора типа и параметров голограмм, который можно применять при неблагоприятных условиях освещения.

Ключевые слова: Оптика, голография, защитные голограммы.

4.5 Увеличение скорости записи устройств дот-матрикс

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

Современные устройства дот-матрикс для записи радужных голограмм последовательной проекцией фрагментов на носитель обеспечивают скорость 1–3 см²/час, что недостаточно для упаковки и дисплейных применений. В работе рассмотрены основные факторы, ограничивающие скорость записи и предложены схемно-технические решения, позволяющие увеличить в несколько раз скорость записи всех типов радужных голограмм. Для голограмм некоторых типов достижимо еще большее увеличение скорости. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: Оптика, голография, дот -матрикс

4.6 Нанопотонные физически неклонируемые защитные метки: создание, оптические свойства и протоколы считывания

П. Н. Кустов¹, М. П. Сандомирский¹, Е. А. Петрова¹, Д. А. Зуев¹

Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены работы по разработке нанопотонных физически неклонируемых защитных меток для применения в системах защиты от подделок. Представлены лазерные методы создания микро- и наноструктур на основе кремниевых и золото-кремниевых гибридных материалов, обладающих уникальными и неповторимыми оптическими свойствами и/или стохастическим расположением. Исследованы спектральные характеристики рассеяния, комбинационного рассеяния и фотолуминесценции, демонстрирующие высокий уровень вариативности между метками. Предложены и протестированы протоколы оптического считывания с использованием алгоритмов компьютерного зрения и др. для аутентификации предложенных защитных меток. Полученные результаты подтверждают перспективность физически неклонируемых меток для практического использования в качестве идентификационных знаков и в системах защиты от подделки.

Ключевые слова: нанопотоника, физически неклонируемые функции, защитные метки, наноструктуры, лазерные методы создания наноструктур, алгоритмы аутентификации.

4.7 Оптически-переменные эффекты на муаровых изображениях, созданные с помощью микролинз в тонких лаковых слоях

Р. Н. Коняшкин¹, к.ф.-м.н. А. А. Щербаков², к.т.н. Е. С. Казарцев¹, к.х.н. Е. М. Фёдорова¹

¹ *Научно-исследовательский институт — филиал акционерного общества «Гознак», Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

В работе определена возможность получения оптических эффектов с использованием лака в условиях полиграфического производства. Проведена оценка возможностей печатного процесса, имеющего ограниченную разрешающую способность, по воспроизведению графических элементов. Создано программное обеспечение для моделирования оптических эффектов на этапе допечатной подготовки. Напечатаны тестовые элементы с заданными эффектами. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых элементов защиты полиграфической продукции.

Ключевые слова: Оптически-переменный элемент, Рельефоприёмный слой, Печатный процесс, Защищенная печать, Муар, Лак, Микролинзы

Секция 5

Интегральная фотоника

Устные доклады

5.1 Поляризующие интегрально-оптические волноводы на основе тонкопленочного ниобата лития

А. В. Булатова^{1,2}, Д. Н. Москалев^{1,2}, А. А. Козлов^{1,3}, В. А. Журавлев^{1,3}, М. А. Ветошкин^{1,3}, Е. Д. Вобликов^{1,2}, У. О. Салгаева^{4,5}, В. В. Криштоп^{1,2,3}

¹ Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

⁴ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁵ ООО «Дифра Лаб», Пермь, Россия

Для задач оптического приборостроения применяются интегрально-оптические волноводы, поддерживающие распространение фундаментальной моды с заданной поляризацией. В работе описаны особенности проектирования поляризующих волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития Х-среза (с толщиной пленки ниобата лития 0,6 мкм), поддерживающих распространение ТЕ-моды оптического излучения с длиной волны 1,55 мкм. Проведено численное моделирование оптических волноводов с целью определения набора геометрических параметров поперечного сечения, обеспечивающих распространение фундаментальной ТЕ-моды и максимальное затухание фундаментальной ТМ-моды. Для проверки полученных результатов были изготовлены образцы интегрально-оптических волноводов для экспериментальной оценки затухания ТМ- и ТЕ-моды. Измерения оптических потерь мощности фундаментальных мод в волноводах качественно подтвердили значения, полученные в результате численного моделирования.

Ключевые слова: Поляризация, Интегрально-оптический волновод, Тонкопленочный ниобат лития, Фундаментальные ТЕ- и ТМ-моды

5.2 Преимущества многомодовых кремниевых волноводов и способы управления их модовым составом в интегральной фотонике

Д. С. Земцов, А. К. Земцова, А. С. Смирнов, С. С. Косолюбов, В. П. Драчев

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В интегральной фотонике многомодовые волноводы играют важную роль. В работе численно обосновывается использование многомодовых волноводов для достижения низких потерь на распространение, а также низкой фазовой чувствительности к конечной точности литографии. Экспериментально показаны потери на распространение в кремниевом волноводе менее 1.5 дБ/см. Также в работе показаны способы управления модовым составом для модуляции и коммутации в фотонных интегральных схемах.

Ключевые слова: Интегральная фотоника, Кремний на изоляторе, волноводная мода, Термооптический эффект, Модуляция

5.3 Электрооптический плазмонный модулятор межмодовой интерференции на кремниевом волноводе

А. К. Земцова¹, Д. С. Земцов¹, И. А. Пшеничнюк¹, А. С. Смирнов¹, К. Н. Гарбузов¹, С. С. Косолобов¹, В. П. Драчев¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Электрооптический модулятор является важным элементом интегральной фотоники. Электрооптическая модуляция света происходит в многомодовом кремниевом волноводе благодаря электрорефракционному эффекту в прозрачном проводящем оксиде индия-олова. Гибридизация волноводной и поверхностной плазмонной мод позволила реализовать модуляцию на длине активной области менее 4 мкм. Изготовленные интегральные структуры были протестированы в составе аналогового оптического тракта. Был измерен коэффициент экстинкции в нескольких режимах: при постоянном напряжении и на частоте. Ключевые слова: Интегральная фотоника, Микроволновая фотоника, Кремний на изоляторе, Электрооптический модулятор

5.4 Эванесцентные волны e-skid волноводов

А. А. Вишневый, Д. В. Грудинин, А. В. Арсенин, В. Волков

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Оптическая анизотропия является ценным ресурсом, позволяющим проектировать фотонные схемы с высокой плотностью интеграции, определяемой глубиной проникновения эванесцентных хвостов волноводных мод. В планарных волноводах эванесцентные хвосты имеют чисто мнимый волновой вектор в направлении спада поля. Это верно как для обыкновенных, так и необыкновенных (волн с экстремально малой глубиной скин-слоя или e-skid) эванесцентных волн. При обобщении концепции планарного e-skid волновода на волноводы с локализацией поля в двух измерениях, возникают эванесцентные волны с ненулевой действительной частью волнового вектора. В докладе будут разобран физический механизм их формирования

Ключевые слова: E-skid волноводы, Оптическая анизотропия, Вандерваальсовы материалы

5.5 Исследование оптического эффекта самовоздействия в гибридных наноструктурах типа металл-полупроводник

А. О. Ларин, Э. И. Агеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены результаты исследования эффекта самовоздействия и его роли при генерации нелинейно-оптического отклика в гибридных наноструктурах типа металл-полупроводник. Рассмотрен подход к их изготовлению с описанием морфологии, исследовано взаимодействие гибридных наноструктур с лазерным излучением фемтосекундной длительности на длинах волн ближнего ИК, а также построены численные модели для интерпретации полученных результатов оптических измерений. Результаты исследования имеют перспективы для разработки наноразмерных ап-конверсионных источников излучения для фотонных интегральных схем в качестве активных компонент.

Ключевые слова: Наноструктуры, Нелинейная оптика, Гибридная нанофотоника

5.6 Многоуровневое переключение фазоизменяемой ячейки в интегральной фотонной схеме

А.А. Невзоров¹, А.И. Проходцов², В.В. Ковалюк¹, П.И. Лазаренко², А.Д. Голиков^{1,2}, С.А. Козюхин³, Г.Н. Гольцман⁴

¹ Лаборатория фотонных газовых сенсоров, МИСИС, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

³ Институт общей и неорганической химии имени им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Работа посвящена исследованию фотонных интегральных схем с перестраиваемыми ячейками на основе халькогенидных фазоизменяемых материалов (ФИМ). Тонкие пленки ФИМ, нанесенные на поверхность одномодового интегрального волновода из нитрида кремния, позволили нам изменять пропускание интегральной схемы на 6 dB с помощью лазерных импульсов, распространяющихся в самом волноводе. В работе мы описываем экспериментальную схему и протокол управления созданными структурами, который позволяет получать не менее 4х безошибочно различных состояний интегрального элемента, характеризующихся различными уровнями пропускания. Полученные нами результаты позволяют создать энергонезависимую многоуровневую ячейку полностью оптической памяти, а также могут найти применение в интегральных оптических нейроморфных системах.

Ключевые слова: Интегральные фотонные схемы, фазоизменяемые материалы, оптические элементы памяти, нейроморфные технологии, энергонезависимая память

5.7 Фотонные интегральные схемы с кольцевыми микрорезонаторами на основе Si₃N₄

А.И. Абанин^{1,2,3}, Р.М. Рязанов², А.Д. Голиков⁴

¹ НПК «Технологический центр», Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

³ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

⁴ Университет науки и технологий «МИСиС», Москва, Россия

Целью работы являлась отработка технологии изготовления фотонных интегральных схем на подложках Si/SiO₂/Si₃N₄. Определены основные режимы, обеспечивающие формирование слоев SiO₂ и Si₃N₄ с толщиной 2,7 и 0,45 мкм соответственно. На подложках методом электронно-лучевой литографии изготовлены кольцевые микрорезонаторы (МКР) различной геометрии. В результате исследования спектров пропускания МКР определены параметры собственной и нагруженной добротности, свободного спектрального диапазона (FSR), оптических потерь. Определены оптимальные геометрические параметры элементов, обеспечивающие получение резонаторов с добротностью $Q > 10^5$ при радиусе кольца резонатора 64 мкм.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, нитрид кремния, кольцевой микрорезонатор

5.8 Волоконные лазерные конфигурации на эффекте захвата частоты

И. С. Паняев¹, П. А. Итрин¹, В. А. Рибенек¹, Д.А. Коробко¹, А.А. Фотиади^{1,2}

¹ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

² Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Метод захвата частоты является эффективным механизмом стабилизации генерации в фотонных интегральных схемах, предназначенных для приложений, где критически важны узкая спектральная линия и низкий фазовый шум. В отличие от традиционных методов фазовой стабилизации, требующих

сложной и дорогостоящей оптоэлектронной техники, лазеры на эффекте захвата частоты обеспечивают пассивную стабилизацию путём захвата моды резонатора с высоким Q-фактором. Пока технологии изготовления интегральных высокодобротных резонаторов ещё находятся на ранней стадии развития, волоконные лазерные конфигурации благодаря значительной длине резонатора уже сейчас обеспечивают рекордные значения Q-фактора. В докладе будут представлены экспериментальные реализации волоконных лазеров, собранные из стандартных телекоммуникационных компонентов, а также рассмотрены особенности механизмов захвата частоты, полезные для последующей интеграции в форматах фотонных интегральных схем.

Ключевые слова: Узкополосные лазеры, Высокодобротные резонаторы, Захват частоты

5.9 Сужение лазерной линии с использованием кремниевых микрокольцевых резонаторов

Вергулес А.И.¹, Земцов Д.С.¹, Земцова А.К.¹, Смирнов А.С.¹, Жигунов Д.М.¹, Гарбузов К.Н.¹, Косолобов С.С.¹, Драчев В.П.¹, Фотиади А.А.², Иванов А.В.³, Ладугин М.А.³, Кицюк Е.П.⁴, Светухин В.В.⁴

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³ НИИ «Полюс» имени М. Ф. Стельмаха, Москва, Россия

⁴ НПК «Технологический центр», Москва, Россия

Целью работы является создание компактного узкополосного лазера для когерентной оптической связи, генерации маломощных микроволновых сигналов, оптической сенсорики и спектроскопии. На платформе «кремний-на-изоляторе» с активным слоем 220 нм был спроектирован и изготовлен микрокольцевой резонатор с добротностью $\sim 150\,000$ для лазера с распределенной обратной связью (РОС). Излучение РОС-лазера вводилось в интегральную фотонную схему с помощью полированного оптического волокна, пристыкованного в горизонтальной геометрии к решеткам ввода/вывода излучения на чипе с суммарными потерями на стыковку 3 дБ. Используя метод самогетеродинной интерферометрии с длинной волоконной задержкой, показано сужение спектральной ширины лазерной линии с 210 кГц до 200 Гц.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, кремний-на-изоляторе, узкополосный лазер, эффект самозахвата частоты, кольцевой резонатор

Секция 6

Интерферометрия и оптическая метрология

Устные доклады

6.1 Спектральная интерферометрия: от классической к квантовой и далее к квантово-вдохновлённой (Приглашенный)

Т. А. Маковецкая¹, Ю. Хунцюнь¹, А. А. Маркварт¹, Н. А. Ушаков¹

¹ Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Измерение расстояний и микроперемещений является важной задачей во многих областях промышленности и научно-технической деятельности человека. Различные интерферометрические методы обеспечивают возможность реализации таких измерений. Тем не менее, улучшение разрешающей способности измерений и подавления негативных эффектов остаётся важной задачей. В докладе проведена параллель между различными интерферометрическими методами: рассмотрены аналитические выражения, описывающие интерференционные сигналы и разрешающие способности классических интерферометрических измерений. Будет показано потенциальное улучшение измерительных характеристик спектральной интерферометрии при использовании бифотонных состояний в качестве зондирующего излучения, а также обсуждены сложности реализации спектральной бифотонной интерферометрии. Предложен подход спектральной интерферометрии, основанный на состояниях с супер-Пуассоновской статистикой, легко реализуемый экспериментально и позволяющий улучшить разрешающую способность классических методов.

Ключевые слова: Спектральная интерферометрия, бифотоны, оптическая когерентная томография, оптическая частотная рефлектометрия, неразрушающий контроль, разрешающая способность

6.2 Опыт применения эталонных зеркал для коррекции аберраций оптической системы интерференционного микроскопа

И.Ю. Фандиенко^{1,2}, Г.Н. Вишняков², В.Л. Минаев², Е.В.Шумский²

¹ ООО "Электростекло", Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

В работе рассматриваются методы повышения точности измерений рельефа поверхности с помощью интерференционного микроскопа. Для коррекции аберраций оптической системы микроскопа использовались стеклянные и жидкие эталонные зеркала. Применение метода фазового сдвига и пространственной фильтрации позволило минимизировать артефакты, вызванные вибрациями. Полученные результаты демонстрируют эффективность абсолютной калибровки микроскопа с помощью жидкого зеркала для точных метрологических исследований, также исследовано влияние точности юстировки опорного канала интерференционного микроскопа на погрешность измерений.

Ключевые слова: интерференционный микроскоп, фазовый сдвиг, жидкое зеркало, шероховатость поверхности, юстировка

6.3 Исследование процесса регистрации спекл-интерферограмм вибрирующего объекта при использовании цифровой камеры с кольцевой апертурной диафрагмой

А. В. Ивченко, А. И. Жужукин, Р. Н. Сергеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

С целью повышения чувствительности спекл-интерферометра с непрерывным лазером и диффузно-рассеивающим элементом, установленным перед тест-объектом, произведена регистрация нормальной составляющей смещения исследуемой поверхности при использовании кольцевой диафрагмы во входном зрачке объектива цифровой камеры. Получен ряд спекл-интерферограмм соответствующих статической деформации, используемого тест-объекта, а также его форм колебаний при вибрационном возбуждении. Показана возможность получения количественной информации о полях вибросмещения и деформации.

Ключевые слова: Спекл-интерферометр, видеокамера, кольцевая диафрагма, регистрация, объект, вибросмещение

6.4 Эффект одновременной регистрации теневой, шлирен и интерферометрической диагностики при применении классических фотоматериалов для голографической интерферометрии плазмы

А.В. Павлов¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Для диагностики фазовых неоднородностей, возникающих над поверхностью образцов, испаряющихся под действием высокочастотного излучения реализована схема двухэкспозиционной лазерной голографической интерферометрии. Голограмма сфокусированного изображения регистрируется на голографической пленке ВРП-М. Показано, что при сканировании пленки в режиме сканирования слайдов получается только картина распределения амплитуды интенсивности, что, в сущности, является теневой фотографией. Отверстие около 5мм в экране затемнения выступает в качестве диафрагмы, что создает «шлирен» эффект. Таким образом, из интерферограммы удастся получить и теневую, и шлирен фотографии, по которым уточняются границы слоев исследуемых газо-плазменных потоков, в том числе ударных волн, на которых интерференционные полосы имеют скачки.

Ключевые слова: Двухэкспозиционная лазерная голографическая интерферометрия, теневая фотография, шлирен-фотография

6.5 Особенности и преимущества интерферометрического контроля асферических поверхностей с применением синтезированных голограмм

Куц Роман Игоревич

ИАиЭ СО РАН

6.6 Интерферометрия приповерхностных слоев, возникающих при светозероизации материалов

А.В. Павлов¹, Ю.Ю. Протасов¹, В.Д. Телех¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Методом двухэкспозиционной лазерной голографической интерферометрии получены данные о распределении параметров в газо-плазменном слое, образующемся над поверхностью материалов при их облучении интенсивным коротковолновым излучением. Основные характеристики воздействия: излучение УФ-ВУФ диапазона спектра, энергия излучения 1 – 2 кДж, длина образцов около 50 мм, размер области визуализации $d = 150$ мм. Особенности диагностической схемы, в частности использование плоских протяженных образцов, позволило обрабатывать интерферограммы в

одномерном приближении, а также найти не только пространственное распределение температуры и концентрации плазмы, образующейся над поверхностью, но и их зависимость от интенсивности облучения.

Ключевые слова: Двухэкспозиционная лазерная голографическая интерферометрия, Излучение УФ-ВУФ диапазона спектра, Приповерхностные газо-плазменные потоки

6.7 Метрологическое обеспечение средств измерений коэффициента передачи модуляции

объективов (Приглашенный)

Геннадий Николаевич Вишняков^{1,2}, доктор технических наук

¹ ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Качество изображения, формируемого объективом, определяется его частотно-контрастной характеристикой или коэффициентами передачи модуляции (КПМ) на различных пространственных частотах. Для обеспечения единства измерений КПМ и создания эталонной базы по воспроизведению, хранению и передаче единицы КПМ усовершенствован Государственный первичный эталон единиц оптической силы очковой оптики ГЭТ 205-2013 в части воспроизведения единицы КПМ в диапазоне длин волн 450–1550 нм. Представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики эталона. В состав ГЭТ 205-2025 входит установка для измерения КПМ оптических систем и набор эталонных объективов.

Ключевые слова: Коэффициент передачи модуляции, Оптическая передаточная функция, Функция рассеяния точки, Объектив, Эталон

6.8 Возможности применения спекл-интерферометрии при доводке конструкций турбомашин

(онлайн)

Жужукин Анатолий Иванович

ПАО "ОДК-Кузнецов"

Стендовые доклады

С.6.1 Исследование поля поверхностных волн на металлических и углеродсодержащих пленках в терагерцевом диапазоне

В.Д. Кукотенко¹, В.В. Герасимов^{1,2}, В.С. Ванда^{1,2}, А.Г. Лемзяков^{1,3}, А.И. Иванов⁴, Д.И. Красников⁵, Н.И. Рагинов⁵, А.К. Никитин⁶

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирская обл., р.п. Кольцово, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁶ Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

В работе исследуются поверхностные волны, распространяющиеся по металлическим и углеродосодержащим плёнкам в терагерцовом (ТГц) диапазоне, с целью разработки плазмонных компонентов систем ТГц-связи. Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) позволяют усилить и локализовать электромагнитное поле вблизи поверхности. Для моделирования ТГц-плазмонных устройств требуется знание эффективной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя, отличающейся от модели Друде. В работе будет представлен метод экранирования для измерения глубины проникновения поля ППП в воздух. Знание глубины проникновения наряду с коэффициентом затухания ППП вдоль направления их распространения позволяет определить требуемые константы. Экспериментальные результаты получены с использованием ТГц-излучения Новосибирского лазера на свободных электронах для золотых, графеновых и углеродных нанотрубчатых плёнок.

Ключевые слова: терагерцовый поверхностный плазмон-поляритон, золотые пленки, графеновые наночастицы, углеродные нанотрубки, лазер на свободных электронах, глубина проникновения

С.6.2 Экспериментальные исследования двухволнового лазерного интерферометра

Е. А. Лавров

ФГУП «ВНИИФТРИ», р.п. Менделеево, Россия

В работе приведены результаты экспериментальных исследований разработанного двухволнового лазерного интерферометра, предназначенного для измерений линейных перемещений при неизвестном профиле температуры на трассе измерения. При измерениях перемещений предложенным лазерным интерферометром снижаются требования к поддержанию метеопараметров на трассе по сравнению с одноволновым интерферометром. В работе описана оптическая схема прибора. Приведена методика исследования метрологических характеристик интерферометра на базисе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199. Разработанный интерферометр позволяет проводить измерения перемещений на трассе до 60 м с погрешностью менее 10 мкм при амплитуде профиля температуры до 1 °С.

Ключевые слова: Двухволновый лазерный интерферометр, Прецизионные измерения длины, Метрология

Секция 7

Квантовые оптические технологии

Устные доклады

Заседание 1

7.1 Квантовая коррекция ошибок в непрерывных переменных (Приглашенный)

Голубева Татьяна Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

7.2 Применение сжатых состояний Фока в квантовых кодах коррекции ошибок

Башмакова Елизавета, Т. Ю. Голубева, С. Б. Королев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В докладе мы продемонстрируем квантовый протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки, где в качестве кодовых слов используются сжатые состояния Фока. Мы сравним предлагаемый протокол с протоколом коррекции ошибок, построенным с помощью сжатых состояний котов Шредингера. Мы покажем конкурентоспособность сжатых состояний Фока в защите квантовой информации в канале с потерей частиц и ошибкой фазы.

Ключевые слова: Квантовые вычисления, Коррекция ошибок, Сжатые состояния Фока, Petz верность канала

7.3 Генерация негауссовых состояний света для квантовых кодов коррекции ошибок

Королев Сергей Борисович, к. ф.-м. н, Е. Н. Башмакова, Т. Ю. Голубева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследована оптическая схема, в которой генерируются негауссовы состояния света с помощью измерения числа частиц в моде двухмодового перепутанного гауссова состояния. В работе, показано, что, подбирая параметры схемы, можно генерировать различные состояния, применимые для квантовых кодов коррекции ошибок потери частиц и дефазировки. Исследована эффективность коррекции различных ошибок с помощью генерируемых состояний.

Ключевые слова: Квантовая оптика, Негауссовы состояния, квантовые коды коррекции ошибок.

7.4 Экспоненциальное сужение линий рэмси-резонанса в оптически плотной резонансной среде (Приглашенный)

Моисеев Сергей Андреевич¹, Герасимов К.И.¹, Миннегалиев М.М.¹, Брекоткин И.В.¹, Моисеев Е.С.²

¹Казанский квантовый центр, КНИТУ-КАИ, г. Казань,

²Department of Physics, McGill University, Montreal, Canada

Теоретически обнаружено экспоненциальное сужение линий резонансов Рэмси в оптически плотной двухуровневой атомной среде. Показано, что сужение линий обусловлено спектральным проявлением эффекта самоиндуцированной прозрачности при возбуждении атомной среды двумя световыми импульсами, имеющими каждый импульсную площадь близкую $\pi/2$. Механизмом возбуждения сверхузких линий выступает формирование сигналов многократного фотонного эха в глубине среды, что подтверждается в эксперименте с кристаллом $167\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ по наблюдению этих сигналов на выходе кристалла. Эксперимент, проведенный нами также по тестированию предсказываемого экспоненциального сужения линий Рэмси резонанса в этом кристалле $167\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ на различной оптической глубине резонансного перехода, подтвердил предсказания теории в сужении линии примерно в 2.4 раза, в соответствии с величиной оптической плотности атомного перехода. Анализ полученных результатов показывает, что использование обнаруженного эффекта открывает возможность создавать предельно узкие линии Рэмси-резонанса, используя существующие оптически толстые резонансные среды, а также ставит новые вопросы о спектральных свойствах когерентного нелинейного взаимодействия световых импульсов с такими средами и его теоретическом описании методом обратной задачи рассеяния

7.5 Спутниковая квантовая криптография точка - точка

В.Л. Курочкин^{1,2,3,4}, А. В. Хмелев^{1,2,3,4}, А. Н. Чернов^{1,2,3,4}, Е. И. Ивченко^{1,2,3,4}

¹ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия*

² *Российский квантовый центр, Москва, 115191, Россия*

³ *КуСпэйс технологии, Москва, 115419, Россия*

⁴ *Университет науки и технологий МИСиС, Москва, 119049, Россия*

Однофотонная квантовая криптография чувствительна к потерям в квантовом канале связи. Потери в свободном пространстве для организации лазерной связи на дальние расстояния меньше, чем при применении оптоволоконных линий. Поэтому на данный момент спутниковые системы квантовой криптографии рассматриваются как перспективные для глобального распределения квантового ключа между произвольными точками. В докладе представлены материалы по развитию инфраструктуры приемных квантовых станций по территории России для организации спутниковых квантовых сетей. Рассмотрены первые экспериментальные результаты по регистрации спутникового квантового ключа.

Ключевые слова: Спутниковая квантовая криптография, Квантовое распределение ключей, Квантовая коммуникационная сеть

7.6 Исследование криптографической стойкости протокола квантовой криптографии на основе пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой

Д. Д. Решетников¹, Е. А. Вашукевич¹

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Исследуется криптографическая стойкость протокола квантового распределения ключей на основе вихревых оптических пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой против атак злоумышленника с последовательными и коллективными измерениями. Вычисляется взаимная информация квантовых систем отправитель-злоумышленник и получатель-злоумышленник, исследуется зависимость взаимной информации от уровня ошибок получателя. Предлагается оптимальная стратегия атаки злоумышленника, а также приводятся оценки критического уровня ошибок в канале распределения ключа в случае различных атак.

Ключевые слова: Квантовое распределение ключей, Аксиально-симметричные поляризационные пучки, Оптические вихри

7.7 Реалистичная атака с безошибочными измерениями на системы КРК

И. С. Суцев^{1,2}, К. Е. Бугай^{1,3}, Д. С. Булавкин¹, А. С. Сидельникова¹, К. Д. Бондарь^{1,2}, В. М. Вахрушева^{1,2}, Д. М. Мелконян¹, Д. А. Дворецкий^{1,3}

¹ *ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия*

² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

³ *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

В работе рассмотрена новая атака с безошибочными измерениями (USD) на системы квантового распределения ключей (КРК). В комбинации с лазерным повреждением оптических аттенюаторов в передатчике системы КРК, использующей метод состояний-ловушек, данная атака позволяет нарушителю выявить весь секретный ключ, оставаясь незамеченным. Оптическая схема, необходимая

для построения атаки представляет собой лишь модификацию приемную часть системы КРК, что делает атаку реалистичной с учетом сегодняшних технологических возможностей.

Ключевые слова: Квантовая криптография, Квантовое распределение ключей, Атаки на системы КРК, Квантовые протоколы, Лазерное повреждение

Заседание 2

7.8 Параметрическая генерация многомодового сжатого излучения при наличии дисперсии внутри резонатора (Приглашенный)

Тихонов Кирилл Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Д. М. Малышев¹,
В. А. Аверченко¹

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В нашей работе мы рассмотрели процесс генерации многомодового квадратурно-сжатого излучения в процессе параметрического рассеяния внутри кристалла, помещенного в оптический резонатор с нескомпенсированной дисперсией групповых скоростей (ДГС). Считая дисперсию малой, нам удалось решить квантовые уравнения Гейзенберга для внутрирезонаторного поля с помощью теории возмущений. Мы показали, какие качественные эффекты, кроме расплывания формы светового импульса, оказывает ДГС на свойства сгенерированного квантового многомодового излучения, а также оценили количественные характеристики этого влияния. Кроме того, мы предложили подход, как влияние ДГС внутри резонатора может быть скомпенсировано в эксперименте с помощью специальной процедуры измерения сигнала без включения в схему дополнительных оптических элементов.

Ключевые слова: квантовая оптика, квадратурно-сжатый свет, дисперсия групповых скоростей, оптический параметрический генератор

7.9 Нелинейные сегнетоэлектрические кристаллы титанил-фосфата калия (Приглашенный)

Шандаров Станислав Михайлович, д. ф. -м. н.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

7.10 Квантовое моделирование химических связей с помощью атомов-бозонов в оптических решётках

Н. А. Мороз¹, К. С. Тихонов^{2,3}, Л. В. Герасимов^{1,4}, А. Д. Манухова^{2,5}, И. Б. Бобров^{1,3}, С. С. Страупе^{1,3} и Д. В. Куприянов^{1,4,6,*}

¹ *Центр квантовых технологий, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Российский квантовый центр, Moscow, Russia*

⁴ *Центр междисциплинарных фундаментальных исследований, ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия*

⁵ *Department of Optics, Palacky' University, Olomouc, Czech Republic*

⁶ *Department of Physics, Old Dominion University, Virginia, USA*

Квантовая химия предоставляет основной инструмент для исследования динамики молекулярных систем, однако моделирование органических макромолекул по-прежнему представляет собой сложную вычислительно задачу. В докладе представлен новый подход к моделированию химических процессов с

помощью атомов-бозонов, помещенных в оптическую решётку. Нами показывается, что для квантовых состояний с минимальным полным спиновым моментом внутреннее сопряжение спиновых переменных с пространственными степенями свободы неразличимых частиц позволяет имитировать атомами-бозонами химическую связь, сформированную фермионами-электронами.

Ключевые слова: Квантовая химия, квантовое моделирование, холодные атомы, оптические решетки

7.11 Оптимизация импульсов управляющего излучения для выполнения перепутывающих квантовых логических операций в системах нейтральных атомов

А. С. Усольцев^{1,2}, Л. В. Герасимов^{1,2}, Д. В. Куприянов^{1,2}, К. С. Тихонов^{1,2,3,4}, С. С. Страупе^{1,4}

¹ *Центр Квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *Центр междисциплинарных фундаментальных исследований НИУ ВШЭ СПб, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

⁴ *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

Проведённые исследования были направлены на повышение эффективности перепутывающих логических вентилей в системах нейтральных атомов, удерживаемых оптическими дипольными ловушками. Ключевой интерес для нас представляла разработка подходов оптимизации временного профиля управляющего излучения, основанных на теории оптимального управления, и, в частности, различных модификаций метода последовательных улучшающих итераций В.Ф. Кротова. Нами получен ряд интересных результатов, демонстрирующих, что существенное улучшение эффективности перепутывания можно достичь путём сочетания различных оптимизационных стратегий.

Ключевые слова: Оптимальное управление, управляющее излучение, квантовый вычислитель, нейтральных атомов.

7.12 Исследование свойств мультимодовых интерферометров из нитрида кремния при криогенных температурах

Е.С. Лебедева^{1,2}, И.О. Венедиктов^{1,2}, В.А. Коровин^{1,2}, Д.М. Кобцев^{1,2}, А.Д. Голиков^{2,3}, П.П. Ан^{2,3}, В.В. Ковалюк^{1,2}, Г.Н. Гольцман^{1,4}

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

² *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

³ *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*

⁴ *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

Наряду с фазовращателями интегрально-оптические делители излучения являются одними из основных пассивных элементов для построения квантово-оптических интегральных схем (QPICs), работающих при гелиевых температурах. Однако, из-за термооптического эффекта, параметры делителей, рассчитанные при комнатной температуре, должны быть модифицированы. В данной работе исследуются коэффициент деления оптической мощности мультимодовых интерферометров из нитрида кремния с различными геометрическими параметрами при охлаждении до криогенных температур. Результаты исследования могут быть использованы при конструировании QPICs для повышения точности одно- и двухкубитных операций на чипе.

Ключевые слова: Оптика, интегрально-оптические делители, мультимодовые интерферометры, коэффициент деления

7.13 Характеристики сверхпроводникового однофотонного детектора под воздействием радиочастотного поля поверхностной ионной ловушки

К.О. Сельх^{1,2}, Е. Сулеймен^{3,4}, С.С. Святодух^{1,3}, П.П. Ан^{2,3}, А.Д. Голиков^{2,3}, В.В. Ковалюк^{1,2}, Г.Н. Гольцман^{1,4}

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

² *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

³ *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*

⁴ *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

В работе исследовано изменение характеристик сверхпроводникового однофотонного детектора (SSPD) из нитрида ниобия под воздействием радиочастотного поля захвата иона в макете поверхностной ионной ловушки при температуре 2К. Представлены результаты зависимости темновых и световых отсчетов, эффективности детектирования от тока смещения, а также изменение критического тока в диапазоне полей 5-40 МГц и амплитуд (0,1-4) В. Результаты показывают, что благодаря высокой эффективности (> 90%), низким темновым отсчетам (< 10 с⁻¹) и малому мертвому времени (< 10 нс) SSPD в поверхностной ионной ловушке может позволить проводить измерение квантового состояния иона с высокой достоверностью и недоступным для других детекторов быстродействием, улучшая тем самым точность подготовки и измерения состояния (SPAM).

Ключевые слова: Поверхностная ионная ловушка, Сверхпроводниковый однофотонный детектор, SNSPD, SMSPD, Нитрид ниобия, Масштабируемый квантовый компьютер на ионах

7.14 Компактные волоконные лазеры для накачки однофотонных источников

Ю.Г. Гладуш¹, М. Мишевский¹, А.А. Мкртчян¹, И. Дьяконов², А.Г. Насибулин¹

¹ *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*

² *Московский Государственный Университет, Москва, Россия*

Работа посвящена разработке импульсных волоконных лазеров для накачки источников одиночных фотонов. Будет представлен компактный и дешевый пикосекундный волоконный лазер, излучающий на длине волны 920 нм. Такой лазер позволяет заменить дорогой и громоздкий титан-сапфировый лазер для накачки источников одиночных фотонов на основе эпитаксиальных квантовых точек, сравнение однофотонности и яркости при использовании двух типов лазеров будет представлено в докладе. Также будут рассмотрены подходы к реализации импульсных лазеров с высокой частотой повторений, излучающих на длине 1550 нм для накачки источников перепутанных фотонов на основе параметрической генерации. Будут рассмотрены два подхода для источников с частотой повторений импульса в несколько ГГц и с частотой повторений сотни ГГц.

Ключевые слова: Однофотонные источники, импульсные лазеры, параметрическая генерация, пикосекундная генерация

Стендовые доклады

С.7.1 Создание оптических котов Шредингера с управляемым сжатием с помощью светоделителя и негауссовых ресурсных состояний: состояния кубической фазы и состояния Фока

А. В. Баева¹, А. С. Лосев^{1,2}, И. В. Соколов¹

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия*

Мы исследуем затвор, способный генерировать сжатые состояния кота Шредингера с высокой верностью в оптическом диапазоне. Затвор основан на перепутывании на несимметричном светоделителе произвольного сигнального и негауссова ресурсного световых полей и последующем гомодинном измерении. Управление параметрами светоделителя позволяет наиболее простым образом получать состояния кота Шредингера с необходимой степенью сжатия. Наряду с точным описанием затвора применяется полуклассический анализ, наглядно демонстрирующий принцип работы затвора и позволяющий выявить существенные статистические свойства выходного состояния, такие как степень сжатия и характерные деформации компонент в состоянии кота Шредингера. Мы представляем сравнительный анализ эффективности затворов, использующих несимметричный светоделитель и различные ресурсные состояния: состояние кубичной фазы и состояние Фока.

Ключевые слова: Негауссовы состояния света, Состояние кота Шредингера, Состояние кубической фазы, Состояние Фока

С.7.2 Метод временной синхронизации для сеансов квантовой связи со спутником

А. Н. Чернов^{1, 2, 3, 4}, А. В. Хмелев^{1, 2, 3, 4}, В.Л. Курочкин^{1, 2, 3, 4}

¹ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия*

² *Российский квантовый центр, Москва, 115191, Россия*

³ *КуСпэйс технологии, Москва, 115419, Россия*

⁴ *Университет науки и технологий МИСиС, Москва, 119049, Россия*

Временная синхронизация часов спутника и наземной станции критически важна для квантового распределения ключей. Предлагаемый метод в своей основе содержит процедуры восстановления частоты следования и временной фильтрации квантовых сигналов. Таким образом наш подход, используя для определения временного сдвига только зарегистрированные сигналы и корреляционный анализ битовых последовательностей, устраняет необходимость в дополнительных синхронизирующих импульсах. Такой метод упрощает бортовое оборудование спутника, снижает стоимость миссии и минимизирует объем постобработки данных. Решение особенно перспективно для компактных квантовых спутников, где критически важны массогабаритные характеристики и энергоэффективность системы.

Ключевые слова: Синхронизация времени, Квантовое распределение ключей, Спутниковые квантовые коммуникации, Корреляционный анализ

С.7.3 Использование машинного обучения для управления линейным оптическим интерферометром

С. С. Кузьмин^{1, 2}, И. В. Дьяконов^{1, 2}, С. С. Страупе^{1, 2}

¹ *Центр Квантовых Технологий, Физический факультет, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Москва, Россия*

Мы разработали алгоритм, который создаёт модель реконфигурируемого оптического интерферометра, не зависящую от архитектурных ограничений. Программирование унитарных преобразований оптических мод основано либо на аналитическом методе получения унитарной матрицы через фазовые сдвиги, либо на оптимизации, если прямое разложение невозможно. Алгоритм применяет контролируемое обучение для согласования модели интерферометра с обучающими данными устройства. Оптимизация использует обученную модель для нахождения фазовых сдвигов в

интерферометре, достигая необходимого унитарного преобразования. Этот подход позволяет настраивать интерферометры без точных аналитических решений, открывая возможности для изучения новых архитектур.

Ключевые слова: Линейная оптика, Линейно-оптические квантовые вычисления, Машинное обучение в линейной оптике

С.7.4 Построение собственных мод оптического параметрического генератора при наличии дисперсии групповых скоростей

Д. М. Малышев¹, В. А. Аверченко¹, К. С. Тихонов¹

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В работе рассмотрена математическая процедура выделения полного набора супермод квантового излучения, полученного при параметрической генерации на нелинейном кристалле, помещенном внутрь резонатора, при наличии дисперсии. При этом для построения частотного профиля таких супермод мы опирались на обобщенное разложение Блоха-Мессии. Найденные решения мы сравнили с решениями, полученными с помощью теории возмущений при малой дисперсии групповых скоростей в нелинейной среде. Такой комплексный подход позволил нам получить наиболее полное представление о физических процессах, происходящих в оптическом параметрическом генераторе с синхронной накачкой.

Ключевые слова: Квантовая оптика, Сжатый свет, Дисперсия групповых скоростей, Супермоды излучения

С.7.5 Описание временной эволюции негауссовых квантовых состояний света с помощью кумулянтов

Х.К.Б. Луна Веронико, К.С. Тихонов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе исследуется использование разложения по кумулянтам для анализа эволюции негауссовых квантовых состояний световых полей. Изучается эволюция кумулянтов различных порядков и их связь с показателями негауссовости, в частности, с вигнеровской негативностью. Рассмотрены наиболее важные типы модельных гамильтонианов, включая взаимодействие Керра, трехмодовое сжатие и преобразование кубической фазы. Анализ проведен для нескольких начальных состояний, таких как вакуумное, фоковское, квадратурно-сжатое и когерентное состояния. Данное исследование позволит повысить эффективность генерации негауссовых состояний в эксперименте, а также подобрать процедуры коррекции ошибок для их применения в различных приложениях.

Ключевые слова: Квантовые поля, разложение по кумулянтам, эволюция кумулянтов, негауссовость, трехмодовое сжатие, кубическая фаза, взаимодействие Керра, квантовая коррекция ошибок

С.7.6 Сравнение полуклассической и квантовой схем генерации случайных чисел для использования в фундаментальных тестах и приложениях

А. А. Кретьова¹, Д. Д. Решетников¹, А. А. Фомина¹, К. С. Тихонов¹

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В работе представлен сравнительный анализ квазиклассического и квантового оптических генераторов последовательностей случайных чисел (ПСЧ) при наличии и в отсутствии дополнительной постобработки (экстракции). Было показано, что использование сильно ослабленного света от когерентного лазерного источника позволяет быстро генерировать ПСЧ, но с низкой степенью случайности. Напротив, квантовый источник на основе спонтанного параметрического рассеяния позволяет получить ПСЧ с низкой скоростью генерации, но с высокой степенью случайности. Также было исследовано смещение света от указанных выше источников для увеличения общей эффективности генерации. Кроме того, для каждого источника было рассмотрено влияние экстракции случайности с помощью методов фон Неймана и Бабкина на качество генерируемых ПСЧ.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовые генераторы случайных чисел, квантовая запутанность, экстракция случайности

С.7.7 Влияние параметров лазерного излучения на вероятность переизлучения однофотонного лавинного фотодиода

А. С. Сидельникова¹, Бондарь К.Д.^{1,2}, Бугай К.Е.^{1,3}, Булавкин Д.С.¹, Вахрушева В.М.¹, Лохматов Р.Ю.¹, Мелконян Д.М.¹, Суцев И.С.^{1,2}, Зызыкин А.П.¹, Дворецкий Д.А.^{1,3}

¹ ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия

² Центр квантовых технологий и Физический факультет Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

³ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию влияния параметров стимулирующего лазерного излучения на вероятность переизлучения однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД) в системах квантового распределения ключей (КРК) и связанной с этим эффектом атаки «backflash» на систему КРК. Было экспериментально подтверждено, что вероятность переизлучения в пределах погрешностей не зависит от длины волны стимулирующего лазерного излучения в спектральном диапазоне 1100-1800 нм. Также была получена нижняя оценка длины секретного ключа в случае проведения нарушителем коллективной атаки на информационные состояния и состояния в побочном канале переизлучения.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, атака «backflash», однофотонный лавинный фотодиод

С.7.8 Перепутывающие двухкудитные операции в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия многомодового света и атомного ансамбля

Р. Сурмай¹, В.А. Чупров¹, Е. А. Вашукевич¹

¹ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе исследуется реализация квантовых логических гейтов в протоколе QND-взаимодействия и их действие на двухкудитную систему. Для описания эволюции двухкудитной системы использован язык преобразований Боголюбова. Нами подобраны подходящие значения управляющих параметров — времени каждого QND-взаимодействия и углов поворота такие, чтобы были реализованы детерминированная нелокальная операция SWAP и запутывающая операция $\sqrt{\text{SWAP}}$. Исследованы вероятности реализуемых в протоколе логических операций с различными силами перепутывания для произвольной размерности системы.

Ключевые слова: Квантовая оптика, квантовые вычисления, кудиты, орбитальный угловой момент.

Секция 8

Технологии микро- и наноструктурирования

Устные доклады

8.1 Алмазная дифракционная оптика ТГц диапазона (Приглашенный)

Максим Сергеевич Комленок, к. ф. - м. н.

Лаборатория лазерной оптики поверхности Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН

8.2 Процессы структурирования высокоразрешающих материалов, свойства и применение структурированных элементов (Приглашенный)

Ворзобова Надежда Дмитриевна, к. т. н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Обобщены результаты исследований процессов микро- и наноструктурирования в объеме и поверхности высокоразрешающих фотополимерных и галогенсеребряных материалов методами голографии и литографии, достигнутые свойства периодических структур различных типов, элементов с произвольной формой поверхности и возможности применений для решения задач дифракционной оптики, защищенной печати, солнечной энергетики, 3D печати.

8.3 Формирование спиральных микроаксиконов в тонких пленках поляризационно-чувствительных материалов

Н. А. Ивлиев^{1, 2}, А. П. Порфирьев², С. Н. Хонина^{1, 2}, Д. П. Порфирьев^{1, 2}

¹ *Институт систем обработки изображений, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Самара, Россия*

² *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия*

³ *Физический институт им. П. Н. Лебедева, Самара, Россия*

Показана возможность изготовления спиральных микроаксиконов в многослойных наноструктурах из халькогенидных стекол, а также в тонких пленках азополимера на основе карбазола. В настоящей работе формирование требуемого фазового и поляризационного распределения осуществлялось с помощью пространственного модулятора света. При этом результирующее фазово-поляризационное взаимодействие формирует продольную компоненту электрического поля, соответствующую спиральному амплитудному распределению. Также продемонстрирована возможность управления направлением вращения и периодом спирального микроаксикона.

Ключевые слова: спиральный микроаксикон, поляризационно-чувствительные материалы, пространственный модулятор света

8.4 Развитие метода контроля формы крупногабаритных асферических зеркал на основе применения цилиндрических рельефно-амплитудных синтезированных голограммных оптических элементов

А. В. Лукин, Андрей Николаевич Мельников, к. т. н.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе обсуждаются перспективные направления развития метода контроля формы крупногабаритных асферических зеркал оптических телескопов на основе использования цилиндрических синтезированных голограммных оптических элементов, и в этих целях предлагаются пути совершенствования и специализации делительной машины маятникового типа.

Ключевые слова: Метод контроля формы, Крупногабаритное асферическое зеркало, Цилиндрический синтезированный голограммный оптический элемент, Делительная машина маятникового типа, Полимерная пленка, Рельефно-амплитудная синтезированная голограмма, Сшивка интерферограмм.

8.5 Гибкие дифракционные оптические элементы на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для оптических датчиков деформаций

М. Д. Васильев, Д. А. Синев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе показана возможность применения периодических рельефов на поверхности силиконовых пленок для определения величины и характера их деформации. Исследуемые образцы были созданы путем переноса рельефа лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных на стальных пластинах, на силиконовые пленки методом импринт-литографии. Период таких структур составляет ~ 1 мкм, что позволяет формировать дифракционные картины во всем диапазоне длин волн видимого излучения. Главной особенностью полученных образцов является их гибкость и растяжимость, что позволяет предложить такие оптические элементы в качестве датчиков деформаций. В работе показаны зависимости изменения угла отклонения ± 1 порядков дифракции для различных длин волн видимого диапазона при деформации дифракционных решеток на силиконе.

Ключевые слова: Дифракционные оптические элементы, ЛИППС, Тензометрические датчики, Датчики деформаций, Импринт-литография

8.6 Запись волноводов в объёме плавленого кварца с помощью ультракоротких лазерных импульсов

А. Е. Рупасов, С. И. Кудряшов, А. В. Богацкая

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе исследуется технология формирования оптических волноводов в плавленом кварце с использованием фемтосекундных лазерных импульсов. Описаны методики лазерной модификации материала, позволяющие создавать волноводы. Показано влияние параметров лазерного излучения (энергия, частота повторения, скорость сканирования) на геометрию и оптические свойства волноводов. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для создания интегральных оптических устройств, включая сенсоры и системы передачи информации.

Ключевые слова: Волноводы, Лазерная запись, Оптические элементы.

8.7 Инновационные подходы к лазерной защите металлов от химического и биологического воздействия

Е.А. Давыдова, М.А. Михалевич, Р.Р. Суслов, М.К. Москвин, Г.В. Романова

Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена разработке методов повышения устойчивости металлов к биообрастанию, минеральным отложениям и коррозии посредством лазерного создания микрорельефа. В рамках исследования изучено влияние лазерного воздействия при создании заданной микрогеометрии на смачиваемость материала, а также дальнейшее влияние смачиваемости и различных форм рельефа на устойчивость к разрушающим загрязнениям. Формирование микрорельефа на поверхности металлов обеспечивается с помощью лазерного излучения наносекундной длительности импульса. Переход поверхности металла из гидрофильного состояния в гидрофобное осуществляется вымачиванием в гидрофобизирующем растворе или длительной выдержкой на воздухе при нормальных условиях. Перспективность разрабатываемых методов подтверждается снижением уровня загрязнений не менее чем в 1,5 раза в сравнении с необработанным материалом.

Ключевые слова: Микроструктурирование, Лазер, Смачивание, Биообрастание, Коррозия, Минеральные отложения

Стендовые доклады

С.8.1 Индуцированные лазерным излучением фазовые превращения в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для устройств фотоники

П.А. Смирнов^{1,2}, И.А. Будаговский³, Т.С. Кункель⁴, А.В. Ромашкин¹, Ю.В. Воробьев⁴, М.П. Смаев^{1,3}, П.И. Лазаренко

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва, Россия

²ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Зеленоград, Москва, Россия.

³Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», Рязань, Россия

Исследованы лазерно-индуцированные фазовые переходы в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, сформированных методом магнетронного распыления поликристаллической мишени. Кристаллизация аморфных пленок проводилась непрерывным лазерным излучением, причем использовались лазерные пучки с различной пространственной структурой. Аморфизация кристаллических пленок осуществлялась импульсным лазерным излучением фемтосекундной длительности. Индуцированные фазовые превращения подтверждались спектроскопией комбинационного рассеяния света. Морфология модифицированных областей изучена с помощью атомно-силовой микроскопии. Закристаллизованные лазером области имели равномерное распределение кристаллитов, для переходов в аморфную фазу определены пороговые энергии. Полученные результаты важны для отработки режимов работы устройств фотоники на основе тонких халькогенидных пленок. Исследование выполнено при поддержке проекта FSMR-2025-0002.

Ключевые слова: Тонкие пленки, Фазопеременные материалы, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, Фотоиндуцированные фазовые переходы, Лазерная кристаллизация, Лазерная аморфизация

С.8.2 Физические основы и технологические аспекты формирования лазерно-индуцированных периодических структур на никеле

М. К. Москвин, Г. А. Мартиросян, Д. Д. Учанова, А. Д. Долгополов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследован метод формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на массивном никеле для создания дифракционных решёток. Оптимизированы параметры лазерного воздействия: длина волны, скорость сканирования, длительность импульса, частота повторения и энергия импульсов, для обеспечения формирования высокорегулярных рельефов с периодом в микронном и субмикронном диапазонах. Продемонстрирована возможность управления симметрией рельефа путём модуляции направления поляризации лазерного излучения в процессе сканирования. Установлена зависимость периода и высоты структур от управляемых параметров лазерной обработки.

Ключевые слова: Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), дифракционная решетка, никель

С.8.3 Шаблонный синтез для получения упорядоченных массивов магнитоплазмонных нанопроводов

Е. П. Кожина¹, С.А. Бедин², И.М. Долуденко², С.С. Косолюбов¹, В.П. Драчев¹

¹ *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*

² *Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

В этой работе магнитоплазмонные наноструктуры из комбинации никеля и серебра были синтезированы методом шаблонного синтеза и исследованы в качестве подложек для SERS-спектроскопии с целью обнаружения органических молекул в низких концентрациях при малой мощности возбуждающего излучения — в диапазоне нескольких микроват. Для изучения взаимосвязи между магнитными и оптическими свойствами проведено сравнение как однокомпонентных нанопроволок из магнитных и плазмонных металлов (никель/серебро, кобальт/серебро), так и слоевых нанопроволок, состоящих из нескольких слоёв. Были измерены петли гистерезиса для полученных структур, а также SERS-спектры R6G без и в присутствии внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: Наноматериалы, шаблонный синтез, магнитоплазмонные наноструктуры, SERS

Секция 9

Цифровая голография и методы визуализации

Устные доклады

9.1 Регистрация и визуализация многомодового колебательного процесса методом прямого фазового восстановления во времени в цифровой голографической интерферометрии

Алексеев Игорь Вячеславович

БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

Аннотация: обновляется

Ключевые слова: обновляется

9.2 Исследование амплитудно-фазовой поляризационной анизотропии пленок ZnO:Ag методом цифровой голографии

Черных А.В., Греско В.Р., Езерский А.С., Резцов Т.В., Циплакова Е.Г., Сергеев М.М., Петров Н.В.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Проведены исследования амплитудно-фазовой поляризационной спектральной анизотропии пленок ZnO:Ag при помощи разработанного цифрового поляризационного голографического микроскопа.

Ключевые слова: Цифровая голографическая микроскопия, поляризация, количественная фазовая визуализация, лазерная обработка, золь-гель пленки

9.3 Метод синтеза бинарных дифракционных оптических элементов с адаптивным применением прямого поиска

А. С. Овчинников¹, П. А. Черёмхин¹, А. В. Шифрина¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

Разработан гибридный алгоритм бинаризации амплитудных голограмм, сочетающий предварительное квантование и бинаризацию с выборочным применением прямого поиска со случайной траекторией. Такой подход позволяет существенно сократить объем итерационной обработки при сохранении высокого качества реконструкции. По сравнению со стандартным прямым поиском время бинаризации уменьшено в 5 ÷ 10 раз при соответствующей потере качества на уровне 10 ÷ 5 % в зависимости от требуемого баланса между точностью и скоростью обработки. Предложенный алгоритм ориентирован на задачи высокоскоростного синтеза бинарных голограмм для оптических DMD-систем.

Ключевые слова: Бинаризация, квантование, амплитудные голограммы, прямой поиск со случайной траекторией, микрозеркальные модуляторы света

9.4 Особенности применения ИИ для анализа изображений частиц, восстановленных из цифровых голограмм

В.В. Дёмин, М. М. Курков, В.Т. Калайда

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36,
634050 Томск, Россия*

Нейросети обычно применяют к изображениям с резкими границами. Изображения частиц, восстановленные из цифровых голограмм, отличаются от обычных изображений наличием когерентных и иных шумов, которые ухудшают качество алгоритмов обработки. В работе исследованы возможности нейросети YOLOv8 по работе с когерентными изображениями планктонных частиц, восстановленными из цифровых голограмм. Показано, что устойчивое распознавание возможно при условии адаптации подходов к классификации с учётом специфики когерентной визуализации. Обоснована целесообразность использования укрупнённой морфологической таксономии, соответствующей внешним признакам, регистрируемым на голографических реконструкциях, что позволяет повысить обобщающую способность модели при переносе между различными акваториями.

Ключевые слова: Оптика, Цифровая голография, Свёрточные нейронные сети, погружаемая цифровая голографическая камера

9.5 Фурье спектроскопия планктонных концентраций по данным *in situ* цифрового голографического мониторинга

В.В. Дёмин, Д. В. Куркова, И.Г. Половцев, А.Ю. Давыдова

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36,
634050 Томск, Россия*

Предлагается метод извлечения информации из временных рядов голографических измерений концентрации планктона, полученных погружаемой цифровой голографической камерой в режиме *in situ* мониторинга. Рассматриваются особенности спектральных характеристик временных рядов планктонных концентраций, зарегистрированных на длительной стоянке в натуральных условиях. Полученные результаты подтверждают эффективность технологии цифрового голографического мониторинга, как инструмента для выявления аномалий поведения, связанных с загрязнением акваторий.

Ключевые слова: Цифровая голографическая камера, Цифровая голография, Фурье спектроскопия, Планкто

9.6 Метрики для оценки качества изображений, восстановленных из цифровых голограмм

Е.К. Баландин, П. А. Черёмхин, А.В. Козлов, Н.Н. Евтихийев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Для задач повышения качества изображений, в том числе восстановленных из цифровых голограмм, измерения степени фильтрации и уровня сжатия требуются корректно оценивать их качество. В связи с этим в настоящее время используется большое количество метрик для оценки качества. В работе проведено численное моделирование синтеза голограмм с различным уровнем шумов и восстановлены изображения из них. Реализованы различные метрики оценки качества двух основных типов: требующих исходное изображение для своей работы и нереференсные. Приведены качественные и количественные результаты сравнения метрик.

Ключевые слова: Цифровая голография, Метрики оценки качества, Шум, Реконструкция изображений, Отношение сигнал/шум, Индекс структурного сходства

9.7 Технология измерений и визуализации микрометровых дефектов методом двухдлинноволновой цифровой голографии (онлайн)

Сементин В.В.¹, Гавриш М.В.¹, Розанов П.К.¹, Прохорова У.В.¹, Погода А.П.¹, Борейшо А.С.¹
Балтийский государственный технический университет «Военмех» Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе продемонстрирована технология по трёхосевой реконструкции поверхности с распознаванием дефектов размерами от 25 до 100 мкм, с возможностью измерения длины, ширины и высоты. Технология заключается в измерении перепадов высот с помощью биений, формируемых волнами с отличающимися длинами волн в пределах 1 нм. Измерения по горизонтали производятся методами цифровой голографии через определяемое в зависимости от дистанции реконструкции значение величины одного пикселя цифрового реконструированного изображения комплексной амплитуды объектной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-03-2025-415).

Ключевые слова: Цифровая голография, двухволновая голографическая интерферометрия, микроскопия

Стендовые доклады

С.9.1 Исследование топологических структур в хиральных нематических жидких кристаллах в реальном времени методом поляризационной цифровой голографии

Т. В. Резцов¹, А. В. Черных¹, Н. В. Петров^{1,2,3}, Т. Орлова⁴

¹ *Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

² *Россия Центр инноваций и развития в Циндао, Харбинский инженерный университет, Циндао, провинция Шаньдун, Китай*

³ *Школа физики, Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай*

⁴ *Ереванский государственный университет, Ереван, Армения*

Мы представляем систему поляризационной голографической микроскопии (РНМ), обеспечивающую одноэкспозиционное получение четырёх интерферограмм с разрешением по поляризации, что позволяет в реальном времени восстанавливать элементы матрицы Джонса для света, прошедшего через хиральные нематические жидкие кристаллы (ЖК). Этот подход даёт возможность динамического наблюдения за зарождением и эволюцией топологических структур со сложным трёхмерным полем директора. Формализм Джонса позволяет получать амплитудные и фазовые распределения, отражающие переход от гомеотропной ориентации к локализованным анизотропным конфигурациям. Предложенная методика может использоваться для создания систем оперативного контроля процессов фотополимеризации и лазерной записи топологических фотонных элементов на основе ЖК.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, поляризационная голография, цифровая голография, топологические солитоны, фазовая модуляция, визуализация в реальном времени

Секция 10

Современные функциональные оптические материалы

Устные доклады

10.1 Сенсibilизация голографических фотополимерных материалов комплексами с переносом заряда (Приглашенный)

В.В. Шелковников^{1,2}, Д.И. Деревянко¹, Н.А. Орлова¹, В.В. Бардин¹

¹Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 9

²Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

Рассмотрена сенсibilизация записи голограмм в фотополимерных материалах комплексами с переносом заряда (КПЗ) между донорными и акцепторными компонентами фотополимерной композиции. Особенностью сенсibilизаторов на основе КПЗ является малое значение коэффициента экстинкции, что позволяет проводить запись в толстых слоях. Вычислены термодинамические параметры образования КПЗ (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса). Проведены квантово-химические расчёты полосы переноса заряда КПЗ и их согласование с экспериментом. Проведено сопоставление чувствительности КПЗ по сравнению с красителями сенсibilизаторами. Предложен механизм фотораспада КПЗ на основе катиона тиоксантениона и трифенилалкилборатного аниона.

Ключевые слова: Голографические фотополимерные материалы, сенсibilизация, комплексы с переносом заряда

10.2 Поляризационная голографическая запись в тонких пленках азобензолсодержащих жидкокристаллических полимеров различного строения

М. А. Бугаков, Н. И. Бойко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

Изучены процессы поляризационной голографической записи дифракционных оптических элементов в тонких пленках азобензолсодержащих жидкокристаллических (ЖК) гребнеобразных полимеров различного строения. При голографической записи в пленках данных полимеров одновременно формируются как поляризационные, так и поверхностно-рельефные решетки вследствие процессов фотоиндуцированного массопереноса. Показано, что уменьшение длины алифатического спейсера, соединяющего основную полимерную цепь и фотохромный фрагмент, и увеличение полярности заместителя в фотохромном фрагменте повышают дифракционную эффективность (ДЭ) записанных решеток. Получены кинетические зависимости описывающие запись каждого типа решеток и проанализировано влияние строения полимера на эти зависимости. Продемонстрировано, что термический отжиг пленок полимеров с записанными решетками повышает ДЭ последних до значений близких к теоретическим вследствие образования ЖК фазы.

Ключевые слова: Голография, Дифракционные оптические элементы, Жидкие кристаллы, Азобензолсодержащие полимеры

10.3 Фазовая модуляция света в пространственных модуляторах на основе сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов

С. П. Котова¹, Е. П. Пожидаев², С. А. Самагин¹

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Представлены результаты исследований возможности использования сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов в качестве электрооптической среды для фазовых пространственных модуляторов света. Измерены электрооптические характеристики кристаллов и выполнено численное моделирование многоэлементных модуляторов. Создан экспериментальный образец 12-секторной спиральной пластины на основе жидкокристаллического сегнетоэлектрика. Детально исследованы её характеристики, включая топологический заряд сформированных кольцеобразных световых полей. Частота реконфигурации формируемых световых полей достигает 3 кГц. Показано, что влияние амплитудной модуляции, возникающей из-за сопутствующего изменения состояния поляризации света, на формирование вихревых световых полей с помощью спиральной пластины не является значимой. Потери, обусловленные использованием поляризатора, не превышают 12%, что приемлемо для ряда прикладных задач.

Ключевые слова: Фазовая модуляция света, Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы, Ферриэлектрические жидкие кристаллы, Квадратичный электрооптический эффект, Секторная спиральная пластина

10.4 Объединение технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе ФТР стекла (Приглашенный)

Н. В. Никоноров, В. А. Попова, Е. М. Сгибнев, В. В. Песняков, А. М. Алексеев, Е. М. Алексеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла — перспективные фоточувствительные материалы для записи объемных голографических оптических элементов, в которых под действием излучения и термообработки (фото-термо-индуцированной кристаллизации) изменяется показатель преломления. В работе рассмотрены вопросы объединения технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе ФТР стекла. Показано, что на основе ФТР стекла можно создавать элементы ввода-вывода излучения и планарные градиентные оптические волноводы, т.е. можно реализовывать монолитную интеграцию голографических и волноводных структур на единой подложке. Модификация поверхности стекла ионным обменом позволяет также увеличивать механическую, термическую и оптическую прочность брэгговских решеток на основе ФТР стекла.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Брэгговская решетка, Ионный обмен, Планарный волновод

10.5 Голографический спекл-экран в фото-термо-рефрактивном стекле

Гавриш М.В.^{1,2}, Розанов П.К.^{1,2}, Погода А.П.², Никоноров Н.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Балтийский государственный технический университет «Военмех» Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Голографические спекл-экраны — диффузоры с управляемой индикатрисой рассеяния — широко используются для проекционных систем с лазерными источниками излучения, применяемых в комплексах космического базирования. Ключевой особенностью спекл-экрана является то, что несмотря на определенную длину волны записи голограммы, на этапе использования эффект диффузного рассеяния обеспечивается для излучения с произвольной длиной волны, в том числе и для белого света. Продемонстрирована технология регистрации спекл-экрана по осевой схеме в фото-термо-рефрактивном стекле. Произведен анализ параметров записывающего излучения, определено оптимальное время экспозиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-03-2025-415).

Ключевые слова: голографический спекл-экран, индикатриса рассеяния, фото-термо-рефрактивное стекло, управление излучением

10.6 Особенности спектров фотолюминесценции легированных кристаллов фосфида галлия

А. А. Скворцова, С. Г. Каленков

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Обнаружено, что при люминесценции кристаллов фосфида галлия $p\text{-GaP}(\text{Zn}, \text{O}, \text{N})$, возникающей под воздействием лазера с длиной волны 405 нм и мощностью не более 30 мВт, возбуждаются две полосы излучения - зеленая ($\lambda = 565$ нм), связанная с рекомбинацией на атомах N и красная ($\lambda = 700$ нм), связанная с примесями Zn и O. Рассматриваемые примесные центры с глубокими уровнями энергии в запрещенной зоне обладают большими временами жизни и возможностью существования в нескольких зарядовых состояниях. В работе установлена зависимость между величиной оптической мощности внешнего излучения и спектрами фотолюминесценции кристаллов легированного фосфида галлия. В частности показано, что при изменении оптической мощности лазера ($\lambda = 405$ нм), происходит перераспределение интенсивности между красной и зеленой линиями спектра фотолюминесценции исследуемых образцов: при низких мощностях ($P < 5$ мВт) тока зеленая люминесценция доминирует над красной, в то время как при больших плотностях тока доминирует красная люминесценция. Таким образом, увеличение мощности внешнего излучения приводит к росту процессов излучательной рекомбинации в пользу Zn-O комплексов.

Ключевые слова: Фосфид галлия, Примесные комплексы, Фотолюминесценция, Оптическая мощность лазерного излучения.

10.7 Фотодетекторы на основе тонких пленок углеродных нанотрубок

Ю.Г. Гладуш¹, С.И. Серебренникова, А.А. Мкртчян¹, П. Ан², В. Ковалюк², С.С. Жуков³, Д.С. Копылова, Д. Красников¹, А.Г. Насибулин¹

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

²Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Москва, Россия

В работе рассмотрены фотоприемники на основе тонких пленок углеродных нанотрубок (ОУНТ), синтезированных методом аэрозольного синтеза. Данный метод позволяет получать тонкие пленки

ОУНТ непосредственно из реактора и переносить их на любую подложку методом сухого переноса минуя необходимость использования жидкой химии. Будут рассмотрены два типа приемников с ОУНТ – на основе болометрического эффекта и пирозлектрические фотоприемники с ОУНТ на ниобате лития. Отклик таких структура может достигать 100 мА/Вт, а быстродействие в случае интеграции ОУНТ на волновод из нитрида кремния при болометрическом эффекте на длине волны 1.55 мкм может достигать 1.5 ГГц.

Ключевые слова: Фотодетекторы, углеродные нанотрубки, интегральная фотоники, нитрид кремния, ниобат лития

10.8 Генерация терагерцового излучения за счет повышения эффективности преобразования частот лазерных источников в окрестности фононного поглощения

Н. А. Николаев¹, Г. В. Ланский²

¹ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

Терагерцовые (ТГц) частоты перспективны для скоростных высокобюджетных систем передачи данных, в связи с чем актуальным является поиск функциональных материалов и методов для работы в неосвоенном в настоящее время диапазоне. Современные телекоммуникационные системы построены на оптических технологиях, поэтому важным является развитие методов повышения эффективности взаимодействия оптического и терагерцового излучения (генерация/детектирование, модуляция/демодуляция). Такое взаимодействие возможно за счет нелинейно-оптических эффектов в кристаллических средах, однако его эффективность составляет порядка 10^{-4} . Значительно ее повысить возможно при работе на частотах в окрестности фононного поглощения сред, где нелинейный коэффициент радикально возрастает. В работе рассмотрен подход генерации ТГц-излучения, основанный на повышении эффективности преобразования частот лазерных источников в область фононного поглощения. Приводятся оценки для сред от модельных однофононных (полупроводники) до сложных молекулярных кристаллов и сегнетоэлектриков.

Ключевые слова: Параметрическое преобразование частот, Нелинейная оптика, Терагерцовый диапазон, Фононное поглощение, Нелинейные кристаллы.

10.9 Алмазная ТГц антенна (Приглашенный)

Максим Сергеевич Комленок, к. ф. -м. н.

Лаборатория лазерной оптики поверхности Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН

10.10 Газогирохромизм оксидированных наноплёнок пермаллоя

Д.П. Куликова¹, К.Н. Афанасьев^{1,2}, А.В. Барышев¹

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия*

² *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия*

В работе исследуются оптические и магнитооптические свойства термически отожжённых наноплёнок пермаллоя. Установлено, что магнитооптическая добротность образцов возрастает более чем на порядок

в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне для оптимальной температуры отжига. Впервые экспериментально продемонстрировано изменение величин фарадеевского вращения и магнитного кругового дихроизма магнитного оксида — окисленного пермаллоя с платиновым катализатором — в водородосодержащей атмосфере. Магнитооптические свойства материала после воздействия H_2 не возвращаются в исходное состояние в воздухе ввиду образования гидроксидов. Дополнительный нагрев при $300^\circ C$ приводит к восстановлению чувствительности наноплёнок к водороду. Показано, что наблюдаемый газогирохромизм является независимым магнитооптическим явлением.

Ключевые слова: Пермаллой, Наноплёнки, Эффект Фарадея, Магнитный круговой дихроизм, водородосодержащая атмосфера, Сенсор водорода.

10.11 Гибридный фоторезистивный материал на основе гидролитически устойчивых тиол-силоксановых олигомеров

Дервянко Дмитрий Игоревич, к.х.н.

ЛОСМ НИОХ СО РАН, Новосибирск

10.12 Органические фототранзисторы на основе полииндола и пирролидинофуллерена: структура и вольтамперные характеристики (онлайн)

Р. Б. Салихов¹, А. Д. Остальцова¹, И. Н. Муллагалиев¹, Т. Р. Салихов¹

¹ *Уфимский университет науки и технологий, кафедра электроники и физики наноструктур, Уфа, Россия*

Исследованы оптоэлектронные свойства нового полимерного материала — поли[2-этил-3-метилиндола] — в сочетании с пирролидинофуллереном для создания органических фототранзисторов. Методом центрифугирования получены тонкие плёнки толщиной 400–500 нм, на основе которых изготовлены полевые транзисторы с алюминиевыми электродами. Проведены измерения вольтамперных характеристик в темновом режиме и под воздействием УФ-излучения (350 нм), показавшие увеличение фототока на три порядка. Установлено, что разработанные структуры стабильно работают в воздушной среде, что упрощает их применение в органической электронике. Результаты демонстрируют перспективность использования данных материалов в оптронах и фотосенсорах

Ключевые слова: Полииндол, Пирролидинофуллерен, Органические фототранзисторы, Подвижность носителей заряда, УФ-фотоотклик, Печатная электроника

Стендовые доклады

С.10.1 Материал "Диффен" за пределами стандартных условий получения голограмм (Приглашенный)

Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В., Сизова С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлено экспериментальное исследование параметров мультиплексных голограмм, полученных на образцах полимерного материала "Диффен" (модификация регистрирующей среды на основе

полиметилметакрилата с фенантренхиноном в качестве светочувствительного элемента, ФХ/ПММА), толщиной более 2 мм. Запись на 488 нм (стандарт) и 530 нм. Постэкспозиционный прогрев при 50 град. в течение 50 час (стандарт) и до 300 час.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Регистрирующие среды, Трехмерные мультиплексные голограммы

С.10.2 Фторфосфатные стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов свинца для лимитеров фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона

В. А. Асеев¹, Н. В. Никоноров¹, А. Н. Цыпкин¹, Е. В. Колобкова^{1,2}, А. О. Исмагилов¹, Е. Н. Опарин¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Обнаружено и исследовано нелинейное поглощение во фторфосфатном стекле с квантовыми точками (КТ) PbS и PbSe при воздействии импульсного фемтосекундного (100 фс) лазера ближнего ИК диапазона (1050 нм). Порог уменьшения (ограничения) мощности проходящего через образец лазерного излучения составил 1265 мВт для КТ PbS и 600 мВт для КТ PbSe. Образцы стекол с КТ PbS и PbSe практически не пропускали лазерное излучение при мощности 1530 мВт и 750 мВт, соответственно. Сделан вывод о том, что фторфосфатные стёкла с КТ PbS и PbSe можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприёмных устройств от импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности в ближнем ИК диапазоне.

Ключевые слова: Фторфосфатное стекло, квантовые точки сульфида свинца, квантовые точки селенида свинца, нелинейно-оптическое поглощение, нелинейно оптический лимитер

С.10.3 Оптическое устройство на основе МАХ-фазы и способ определения остаточной МАХ-фазы в максенах

А. В. Сюй¹, А. В. Арсенин², В. С. Волков¹

¹ ООО «КСПАНСЕО», Москва, Россия

Оптическое устройство содержит прозрачное основание и фотоактивные частицы, образованные из МАХ-фазы, имеющей химическую формулу $M_{n+1}AX_n$, где М - переходный металл; А — алюминий; Х - углерод или азот; n = 1, 2 или 3. При этом фотоактивные частицы выполнены размером от 5 нм до 200 нм, а содержание остаточного алюминия в них по отношению к исходному содержанию в МАХ-фазе составляет не менее 1%.

Способ определения остаточной МАХ-фазы в максенах заключается в измерении интенсивности фотолюминесцирующей полосы на 694 нм при возбуждении излучением с длиной волны в диапазоне от 350 нм до 650 нм и интенсивностью в диапазоне от 0.5 мВт/мкм² до 100 мВт/мкм².

Ключевые слова: МАХ-фаза, максен, остаточный алюминий, спектральные характеристики.

С.10.4 Перенос энергии электронного возбуждения между молекулами органических красителей и бактериородопсином

Ю. Д. Лантух

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Белок бактериородопсин способствует процессу бесхлорофильного фотосинтеза в клетках галофильных архебактерий и является природным органическим фотохромом. Пленочные формы бактериородопсина (БР) во многом сохраняют рекордные параметры фотохромного цикла белка. В нашей работе представлены результаты экспериментов по разработке модели оптически управляемого транспаранта на основе фотохромизма пленочных образцов БР. Молекулы органических красителей акридинового ряда были иммобилизованы в пленки БР и служили донором энергии. При лазерном возбуждении донора, но вне полосы поглощения акцептора — БР, наблюдалось обратимое исчезновение полосы поглощения белка в видимой области. Данный эффект можно отнести к управляемому фотохромизму БР за счет процесса FRET. Возвращение системы в исходное состояние происходит самопроизвольно или принудительно путем подсветки на длине волны 405 нм.

Ключевые слова: Бактериородопсин, фотохромный цикл, перенос энергии, управляемый транспарант

С.10.5 Оптические особенности голограмм китайских магических зеркал

Д.Д. Шаров², С.К. Стафеев^{1,2}, Н.Г. Анисимова², Ю.А. Вавилова²

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

² *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

В работе рассматриваются оптические особенности голограмм китайских магических зеркал. Была осуществлена запись аналоговой монохромной голограммы одного из таких зеркал по схеме Ю. Н. Денисюка. В процессе воспроизведения голограммы был обнаружен интересный эффект: скрытый узор, невидимый человеческому глазу на отражающей поверхности зеркала, четко проявился в голографическом изображении. Это свидетельствует о том, что микродеформации зеркала, ответственные за эффект "магии", были зафиксированы голографическим методом. Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность голографии к микроструктурам и открывают перспективы её использования для исследования исторических артефактов с аналогичными скрытыми характеристиками.

Ключевые слова: художественная голография, микродеформация, монохромная голограмма

С.10.6 Ag и Mn-содержащие фотокаталитические наноматериалы системы ZnO-ZnAl₂O₄ для экологических приложений

С. К. Евстропьев^{1,2,3}, А. А. Шелеманов², Г. С. Полищук¹, Д. А. Гаврилова^{1,3}, Н. В. Никоноров², К. В. Дукельский¹

¹ *АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия*

² *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия*

В работе полимерно-солевым методом синтезированы фотокаталитические нанокомпозиты системы ZnOZnAl₂O₄, модифицированные ионами серебра или марганца. Проведено исследование кристаллической структуры и морфологии материалов и изучены их способность к фотогенерации химически активных форм кислорода, спектрально-люминесцентные, фотокаталитические и бактерицидные свойства. Установлено, что внедрение модифицирующих ионов серебра и марганца в структуру оксидных нанокристаллов приводит к деформации их кристаллической решетки и

формированию структурных дефектов, оказывающих существенное влияние на свойства материалов. Показана перспективность материалов для очистки и обеззараживания воздуха и водных сред.

Ключевые слова: Фотокатализ, Наноматериалы, Полимерно-солевой синтез

С.10.7 Влияние фото-термо-индуцированной кристаллизации на ионный обмен в фото-термо-рефрактивном стекле

В. А. Попова, Н. В. Никоноров, Е. М. Сгибнев, В. В. Песняков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

При объединении двух технологий (фото-термо-индуцированной кристаллизации - ФТИК и низкотемпературного ионного обмена - НИО) в фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле возникает вопрос о возможном влиянии ФТИК (закристаллизованной области) на последующий процесс НИО. Т.е. может ли выступать закристаллизованная область ФТР стекла в качестве маски, блокирующей НИО, или наоборот, которая может увеличивать скорость диффузии, или не влиять на процесс диффузии. Для ответа на этот вопрос был проведен НИО Na-Ag и Na-K. Исследования методом волноводной спектроскопии и анализ угловой селективности брэгговских решеток показали следующие результаты. Закристаллизованная область ФТР стекла слабо влияет на ионный обмен, т.е. волноводные структуры практически с одинаковыми параметрами образуются как в закристаллизованной, так и в незакристаллизованной области.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Фото-термо-индуцированная кристаллизация, Брэгговская решетка, Ионный обмен, Планарный волновод

Секция 11 **Биофотоника**

Устные доклады

II.1 Оптические когерентные методы в диагностике сахарного диабета и его осложнений (Приглашенный)

В.В. Тучин,^{1,2,3} Ю.И. Сурков,¹ А.А. Харченко,¹ И.А. Серебрякова,¹ П.А. Тимошина,^{1,2} Д.К. Тучина,^{1,2} Э.А. Генина^{1,2}

¹ *Институт физики и Научный медицинский центр, Саратовский государственный университет, 410012 Саратов, Россия*

² *Междисциплинарная лаборатория биофотоники, Томский государственный университета, 634050 Томск, Россия*

³ *Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», 410028 Саратов, Россия*

В работе предлагается использовать метод оптического просветления для определения состояния различных тканей и органов при диабете по измерениям скорости диффузии оптических просветляющих агентов (ОПА). Поскольку проницаемость ткани для ОПА и потоков воды во многом определяется структурой ткани, которая значительно изменяется в процессе ее гликирования, изменение скорости диффузии молекул в ткани может быть использовано в качестве биомаркера степени гликирования ткани. В качестве оптических методов мониторинга диффузии и воздействия ОПА на ткани в работе используется спектрофотометрия, оптическая когерентная томография (ОКТ), статистика спеклов с пространственно-временным корреляционным анализом и спекл-контрастная визуализация кровотока лабораторных животных. Надежно установлено, что скорость диффузии ОПА, измеренная различными методами, существенно отличается для здоровых и гликированных тканей. Такое различие может служить маркером степени гликированности белков тканей. Обнаружены также существенные различия реакции кровотока на воздействие ОПА в СД и контрольной группах лабораторных животных, что обусловлено нарушением механизмов эндотелий зависимой вазодилатации при СД. Таким образом, ОПА могут быть также использованы в качестве маркеров состояния сосудистой системы при развитии СД. Полученные данные необходимы при разработке эффективных протоколов лечения диабетиков с учетом замедленной диффузии фармацевтических препаратов в гликированных тканях.

Ключевые слова: ОКТ, статистика спеклов, спекл-контрастная визуализация, сахарный диабет, гликирование белков, оптическое просветление, оптические просветляющие агенты

II.2 Конфокальный голографический сканирующий микроскоп на базе Olympus и его применение в биомедицинской оптике (Приглашенный)

Ю.Н. Захаров

Гарвардский университет, Бостон, США

Конфокальный голографический сканирующий микроскоп реализован на базе микроскопа Olympus FV-1000 путём замены блока фильтров возбуждения и регистрации флуоресценции на голографический модуль. Цифровое восстановление волнового фронта позволяет проводить количественную фазовую

визуализацию и картографирование показателя преломления биологических клеток с численной перефокусировкой по всему объёму образца. Предлагаемый подход исключает необходимость механического сканирования вдоль оптической оси и обеспечивает расширенные возможности трёхмерной микроскопии. Проведена калибровка системы на тестовых объектах (полистирольные микросферы), а также продемонстрировано применение метода для анализа клеток аденокарциномы пищеварительного тракта.

Ключевые слова: Биомедицинская оптика, Голографическая микроскопия, Клиническая диагностика

11.3 Терагерцовая оптоэлектроника и биофотоника (Приглашенный)

К.И. Зайцев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

В докладе будет рассмотрено современное состояние исследований и разработок в области биомедицинских применений терагерцовых (ТГц) технологий. Внимание будет уделено оригинальной элементной базе и системам ТГц импульсной спектроскопии, сверхразрешающей микроскопии и эндоскопии. Будут рассмотрены результаты исследования эффектов взаимодействия ТГц волн с биологическими тканями в нормальном состоянии и при наличии патологии. Будут даны оценки перспективности применения ТГц техники в диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований различной нозологии и локализации.

Ключевые слова: ТГц излучение, ТГц технологии, ТГц импульсная спектроскопия, сверхразрешающая ТГц микроскопия, оптика биологических тканей

11.4 Мультифункциональные и мультимодальные контрастные агенты (Приглашенный)

Горин Дмитрий Александрович, д. х. н.

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

11.5 Резонансные наноструктуры для нанофотонных биосенсоров (Приглашенный)

Д. А. Зуев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Резонансные нанофотонные структуры являются перспективными системами для создания простых и эффективных оптических биосенсоров. В качестве примера таких систем, в докладе будут рассмотрены гибридные наноструктуры для термически-индуцированных преобразований органических соединений и их отслеживания в реальном времени при помощи резонансно-усиленного сигнала рамановского рассеяния, хиральные наносистемы для высокочувствительного определения маркеров нейродегенеративных заболеваний, а также колориметрические системы на основе резонансных цепочек наночастиц для экспресс-детектирования вирусов. Отдельное внимание будет уделено бифункциональным нанофотонным платформам, сочетающих возможности как детектирования малых концентраций органических соединений в воде, так и их нейтрализации под действием солнечного света. Работа выполнена в рамках Федеральной программы поддержки академического лидерства “Приоритет 2030”

Ключевые слова: Резонансные наноструктуры, Нанофотоника, Биосенсоры

11.6 Мультимодальный подход к фототерапии рака (Приглашенный)

Э. А. Генина¹, А. Б. Бучарская², В. Д. Генин¹, Н. А. Наволокин², Н. А. Шушунова², О. Иноземцева¹, Д. В. Сафронов², Б. Н. Хлебцов³, В. В. Тучин^{1, 4, 5}

1 — Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

2 — Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России, Саратов, Россия

3 — Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, ФИЦ "Саратовский научный центр РАН", Саратов, Россия

4 — Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

5 — Институт проблем точной механики и управления РАН, ФИЦ "Саратовский научный центр РАН", Саратов, Россия

В докладе представлены разработанные нами технологии комбинированной терапии модельного рака у грызунов, включающие лазерную плазмонную фототермическую терапию (ПФТТ), фотодинамическую терапию (ФДТ) и сонодинамическую терапию (СДТ). В качестве сенситизаторов использовались золотые наностержни, растворы фотосенса, радахлорина и индоцианинового зелёного. Для облучения использовались диодные лазеры (660 и 808 нм) и низкочастотный терапевтический ультразвук (1 МГц). Результаты гистологического исследования опухоли через 72 часа и 21 день после воздействия показали максимальную некротизацию опухоли при мультимодальном воздействии. Работа поддержана грантом РНФ № 23-14-00287.

Ключевые слова: Лазерная плазмонная фототермическая терапия, Фотодинамическая терапия, Сонодинамическая терапия, Модельная опухоль.

11.7 Исследование оптического просветления *in-vivo* в условиях развития экспериментального диабета 1 типа методами ОКТ и спекл-визуализации

П. А. Тимошина^{1,2,3}, Ю. И. Сурков^{1,3}, В. В. Тучин^{1, 2,3}

¹ Институт физики, Саратовский государственный университет, ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия.

² Лаборатория лазерной молекулярной визуализации и машинного обучения, Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия.

³ Лаборатория биомедицинской фотоакустики, Саратовский государственный университет, ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия

Используя комбинацию диагностических методов, включая лазерную спекл-контрастную визуализацию и оптическую когерентную томографию, в исследовании изучается возможность дифференциации тканей и органов здоровых крыс и крыс с экспериментальным диабетом 1 типа на основе характера динамических и структурных изменений, которые происходят при местном применении оптических просветляющих агентов. Кроме того, мы оценили эффективность магнитно-резонансных контрастных и рентгеноконтрастных агентов в целях снижения рассеяния.

Ключевые слова: Оптика, спекл-визуализация, оптическое просветление

11.8 Оптически чувствительные наночастицы для оптического нагрева и термометрии в клетках на наномасштабе

М. В. Зюзин¹, Е. Н. Герасимова¹

¹ *Физический факультет, Университет ИТМО, 191002 Санкт-Петербург, Россия*

В исследованиях представлены два инновационных метода точного мониторинга температуры вне и внутри биологических объектов. Мы фокусируемся на таких методах термометрии как оптически детектируемый магнитный резонанс (ODMR) и термочувствительный Стоксовский сдвиг комбинационного рассеяния света. Эти методы используются нами для мониторинга температуры в реальном времени во время доставки биологически активных соединений в клетки, и также при проведении фототермической терапии.

Ключевые слова: Нанотермометрия, измерение температуры в клетках, оптически-обнаруживаемый магнитный резонанс, рамановская спектроскопия

II.9 Исследование процесса гликирования коллагена методом многоволновой рефрактометрии

Е. Н. Лазарева^{1, 2}, В. В. Тучин^{1, 2, 3}

¹*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

³*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия*

Данная работа посвящена изучению процесса гликирования растворов коллагена методом многоволновой рефрактометрии. Измерялась действительная часть показателя преломления раствора коллагена при различных концентрациях глюкозы (от 0 до 1000 мг/дл с шагом 100 мг/дл) от нескольких часов до пяти недели инкубации. Показатель преломления измерялся на многоволновом рефрактометре Аббе на длинах волн 486, 589, 800 и 1300 нм. Теоретические значения показателей преломления были рассчитаны при предположении, что взаимодействия между молекулами коллагена и глюкозы не происходит. Результаты показали, что при длительной инкубации показатель преломления растворов коллагена в присутствии глюкозы увеличивается, что может свидетельствовать о формировании гликированного комплекса и протекании процесса гликирования.

Ключевые слова: Гликирование белков, коллаген, показатель преломления

II.10 Лазерная спекл-контрастная визуализация с анализом главных компонент: новый подход к оценке кровотока, не зависящей от глубины

Ю. И. Сурков¹, П. А. Тимошина¹, И. А. Серебрякова¹, И. С. Увакин¹, Д. Ставцев², И. Козлов², Г. Пьявченко², И. Меглинский², А. Коновалов², Д. Тельшев², С. Кузнецов², Э. А. Генина¹, В. В. Тучин¹

¹*Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

²*Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Москва, Россия*

Текущее исследование представляет усовершенствованный метод лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) с фильтрацией главных компонент (ГК) для улучшения оценки кровотока в подповерхностных сосудах. Использование ГК позволяет эффективно разделять статические и динамические компоненты сигнала, значительно повышая точность измерений даже при наличии рассеивающих слоев вокруг сосудов. Тесты на фантомах (глубина 0,6–2 мм) и *in vivo* (ухо мыши) показали заметное улучшение контрастности и разрешения изображения. Предлагаемый подход демонстрирует высокую чувствительность к скорости кровотока в физиологическом диапазоне (0,98–19,66 мм/с) и низкую зависимость от глубины залегания сосудов, преодолевая основное ограничение традиционных методов ЛСКВ.

Ключевые слова: Лазерная спекл-визуализация, Спекл-контраст, Анализ главных компонент, Скорость кровотока, Визуализация сосудов

11.11 Оптотермические пинцеты для биомедицинских применений

А.М. Майорова¹, С.П. Котова¹, Н.Н. Лосевский¹, С.А. Самагин¹, В.К. Урюпина^{1,2}, Н.А. Горбунов^{1,3}

¹ Самарский филиал ФИАН, Самара, Россия

² Самарский университет, Самара, Россия

³ Медицинский университет «Реавиз», Самара, Россия

В докладе внимание акцентируется на особенностях оптотермических пинцетов, актуальных для биомедицинских применений. В частности, демонстрируются возможности понижения температуры в области оптотермического манипулирования за счет работы в охлаждаемой кювете. Рассматриваются различные конфигурации лазерных ловушек для равномерного позиционирования микрообъектов с последующей фиксацией. Ловушки в виде массивов точек, колец и замкнутых контуров формируются с использованием жидкокристаллического пространственного модулятора света. Соответствующие фазовые маски рассчитывались на основе оптики спиральных пучков. Массивы ловушек формировались с помощью мозаичных фазовых элементов. Эксперименты проводились с различными микрообъектами, включая модифицированные полимерные микросферы с нанесенными антигенами. Ключевые слова: оптотермическое манипулирование, температура охлаждения, полимерные микросферы, антигены

11.12 Детектирование стероидных гормонов кортизола и кортизона терагерцовыми метаматериалами

Д. С. Устьянцева^{1,2}, М. Р. Конникова^{3,4}, О. П. Черкасова^{1,3}, Н. А. Николаев^{1,2}

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Исследованы особенности применения ряда терагерцовых (ТГц) метаматериалов для детектирования стероидных гормонов кортизола и кортизона в биожидкостях. Дизайн метаматериала относится к структуре расщепленного кольца (SRR) из золота или алюминия на подложке из кварца и кремния соответственно. Измерены зависимость пропускания и сдвига резонансных частот метаматериалов от количества гормонов в диапазоне от 14 до 40 нмоль. Показана зависимость отклика ТГц метаматериала от дипольного момента молекул. Рассчитаны основные показатели эффективности и чувствительности метаматериалов и определены наиболее перспективные для дальнейшего применения.

11.13 Количественная спекл-диагностика внутриклеточных процессов

А. П. Владимиров^{1,2}, Ю. А. Михайленко²

¹ Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

² Федеральный научно-исследовательский институт «Виром» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

Целью доклада являются обсуждение нового оптического метода, позволяющего в режиме реального времени изучать внутриклеточные процессы с пространственным разрешением порядка 1 мкм.

Актуальность подобных исследований связана с тем, что мало изучены процессы, протекающие в клетках во времени. Дается краткий обзор, полученный ранее и новых результатов по изучению реакции культивированных клеток на некоторые внешние воздействия. Недостатком проведенных исследований являлось изучение относительно медленных процессов. Рассмотрены перспективы изучения быстропротекающих процессов на новой технической базе.

Ключевые слова: Спекл-диагностика, Живые клетки, Внутриклеточные процессы

11.14 Применение оптического просветления для повышения информативности мультимодального метода скрининга новообразований кожи

И. А. Серебрякова¹, Ю. И. Сурков¹, Э. А. Генина^{1,2}, Я. К. Кузинова³,
О. М. Конопацкова³, В. В. Тучин^{1,2,4}

¹ *Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*

² *Томский государственный университет, Томск, Россия*

³ *Саратовский государственный медицинский университет, Саратов, Россия*

⁴ *Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия*

В данной работе представлены результаты сравнительного исследования оптического иммерсионного просветления доброкачественных новообразований кожи человека. Мультимодальный метод скрининга, позволяющий получать результаты исследования в режиме реального времени, основан на сочетании спектроскопии диффузного отражения, оптической когерентной томографии и высокочастотной ультразвуковой визуализации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение оптических просветляющих агентов снижает рассеяние света в биотканях за счёт выравнивания показателей преломления внутриклеточных и внеклеточных компонентов, что улучшает разрешение и информативность получаемых данных *in vivo*.

Ключевые слова: Новообразования кожи, Оптическое просветление, Спектроскопия диффузного отражения, Оптическая когерентная томография, Высокочастотный ультразвук

11.15 Система поддержки принятия врачебных решений в цифровой диафаноскопии верхнечелюстных пазух с применением сверточных нейронных сетей (онлайн)

Е.О. Брянская¹, Д.В. Герасин¹, А.В. Бакотина², А.Ю. Овчинников², Ю.О. Николаева², А.В. Масленникова², В.В. Дрёмин¹, А.В. Дунаев¹

¹ *Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия*

² *ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, г. Москва, Россия*

Работа посвящена разработке системы поддержки принятия врачебных решений для классификации зарегистрированных с помощью программно-аппаратного комплекса цифровой диафаноскопии диафаногам верхнечелюстных пазух на основе сверточной нейронной сети ResNet 50. Разработанная модель классификации позволяет классифицировать состояние тканей верхнечелюстных пазух на классы «синусит/отсутствие патологии» со значениями чувствительности и специфичности — 0,84 и 0,96 соответственно; на классы «кистозные изменения/отсутствие патологии» — 0,85 и 0,91 соответственно. Таким образом, разработанная классификационная модель может быть применена для цифровой диафаноскопии с целью раннего выявления патологий верхнечелюстных пазух в телемедицине и при

проведении ЛОР-консультаций в автоматизированном режиме с использованием системы поддержки принятия клинических решений.

Ключевые слова: Цифровая диафаноскопия, Система поддержки принятия врачебных решений, Синусит, Диафаногаммы, Сверточные нейронные сети

11.16 Особенности отклика клеток на фотодинамическое воздействие с протопорфирином IX (Приглашенный)

А. В. Белашов¹, А.А. Жихорева¹, И.А. Горбунова¹, Д.М. Бельтюкова¹, Д.А. Горбенко²,
И.В. Семенова¹, О.С. Васютинский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены результаты исследования механизмов гибели клеток при фотодинамическом воздействии (ФДВ) с эндогенно генерируемым фотосенсибилизатором протопорфирин IX (PrIX). Эксперименты проводились методом голографической томографии. Показано заметное различие в реакции клеток на ФДВ при их культивировании в среде при наличии и отсутствии сыворотки. Проведено исследование аффинности PrIX к альбумину и эффективность генерации синглетного кислорода при связывании PrIX с альбумином.

Ключевые слова: Протопорфирин IX, альбумин, синглетный кислород, фотодинамическое воздействие, механизмы клеточной гибели

Стендовые доклады

С.11.1 Оценка острой и хронической токсичности наносенсибилизатора в зависимости от доз введения различным животным

Е. Н. Лазарева^{1,2}, А.М. Мыльников³, Н. А. Наволокин³, И. Ю. Янина^{1,2}

¹ Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

² Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Саратовский государственный медицинский университет, Саратов, Россия

Целью работы было провести оценки острой и хронической токсичности наносенсибилизатора на основе апконверсионных наночастиц (АКНЧ) в зависимости от доз введения лабораторным животным (крысы, мыши). АКНЧ [NaYF₄:Yb³⁺, Er³⁺] (фторидная матрица, легированная ионами иттербия и эрбия) были синтезированы гидротермальным методом. Использовали АКНЧ, покрытые оболочками из человеческого сывороточного альбумина и цианина 3В NHS-эфира (Cy3) (ООО «Люмипроб Рус», Москва, Россия). Концентрация АКНЧ составляла 2 мг/мл. В среднем объем однократного внутривенного введения крысе составлял 0,95 мл, мыши — 0,12 мл. Все дозировки приводили к обратимым морфологическим изменениям, грубых изменений в виде гибели клеток миокарда, почек, печени или развития выраженных аллергических реакций в легких не обнаружено.

Ключевые слова: токсичность, наносенсибилизатор, апконверсионные наночастицы

С.11.2 Фотосонодинамическая терапия модельных опухолей у грызунов

В. Д. Генин¹, А. Б. Бучарская², Н. А. Наволокин², Н. А. Шушунова², В. В. Тучин^{1,3}, Э. А. Генина¹

¹ *Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

² *Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, Саратов, Россия*

³ *Институт проблем точной механики и управления РАН, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия*

В работе исследуется комбинированное применение фото- и сонодинамической терапии при лечении модельных опухолей рака у грызунов. В качестве фотосенсибилизатора использовался препарат «Радахлорин» («Рада-Фарма», Россия) с пиком поглощения на 660 нм. Препарат вводился внутривенно в дозе 40 мг/кг веса животного. Для фотодинамической терапии использовался медицинский лазерный аппарат «Латус-Т» ("Аткус", Россия) с длиной волны излучения 662 нм. Для сонодинамической терапии использовался аппарат для ультразвуковой терапии "Dynatron 125 Ultrasound" (Dynatronics, США) с частотой излучения 1 МГц.

Ключевые слова: терапия опухолей, фотосенсибилизация, фотодинамическая терапия, сонодинамическая терапия

С.11.3 Оценка тканевых эффектов при имплантации углерод-углеродных композитов методом МРТ

П. Е. Зайцев¹, А. С. Скрыбин², А. В. Шакуров², В. В. Жердева¹

¹ *Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук. 119071 Москва, Ленинский пр-т, 33, 2*

² *Факультет энергомашиностроения, Московский государственный технический университет имени Баумана, Москва 105005, Россия*

Разработка прижизненных методов оценки биоинтеграции имплантируемых материалов и прогностических критериев успешной имплантации актуально для персонализированной медицины. Целью работы является разработка МРТ-критериев для определения биоинтеграции углерод-углеродных композитов. Исследования проводили на мышах BDF1, которым были имплантированы композиты. Методом МРТ оценивали структуру формирующейся вокруг импланта соединительно-тканной капсулы в динамике *in vivo* и в ауоптатах. Критерием эффективности биоинтеграции служило количественное соотношение рыхлой и плотной соединительной ткани в структуре фиброзной капсулы. Разработан алгоритм, основанный на МРТ-визуализации и методе проекций максимальной интенсивности, позволяющий проводить количественную оценку данного параметра. Предложенная методика демонстрирует потенциал для дифференциации типов соединительной ткани не только *ex vivo*, но и *in vivo*.

Ключевые слова: углерод—углеродные композиты; имплантация; МРТ; биоинтеграция; соединительно-тканная капсула; плотная соединительная ткань; рыхлая соединительная ткань

С.И.4 Исследование липидных рафтов с помощью биосенсора на основе фотонных интегральных схем

И. Н. Флоря¹, И. А. Андриевская², Е. М. Устинов², А. Ю. Кузин^{1,3}, А. Д. Голиков⁴, В. С. Галанова^{1,3}, Д. М. Кобцев¹, В. В. Ковалюк^{1,5}, Г. Н. Гольцман^{5,6}

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания», Благовещенск, Россия

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁴ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁶ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Сенсоры на основе фотонных интегральных схем (ФИС) и микрофлюидных каналов выделяются среди множества датчиков благодаря высокой чувствительности (> 100 нм/RIU), низкому пределу обнаружения (< 10 млн⁻¹) и малому объему требуемого аналита (< 20 мкл). Они могут неразрушающим образом обнаруживать аналит в реальном времени без использования меток. Изготовленные нами ФИС впервые применялись для измерения показателя преломления липидных рафтов в градиентных фракциях оптипрепа. Сравнение экспериментальных данных с данными рефрактометрии показывает хорошее согласие двух методов, открывая путь к определению ультранизких концентраций липидных рафтов и изучению их влияния на свойства иммунных клеток, связанных с развитием инфекционно-воспалительных заболеваний и постинфекционных осложнений.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, Микрофлюидные каналы, Комплексный показатель преломления, Липидные рафты

Секция 12

Опτικο-цифровые информационные системы и оптические коммуникации

Устные доклады

12.1 Фазовый ввод информации в 4F системе (Приглашенный)

Скиданов Роман Васильевич
Самарский университет

12.2 Вычислительный дифракционный метод регистрации и компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах

З. С. Марков, Т. З. Миниханов, Е. Ю. Злоказов

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

В докладе представлены результаты экспериментального исследования вычислительного дифракционного метода регистрации волнового фронта на основе алгоритма Герчберга-Сэкстона с использованием случайных фазовых масок для задачи компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах. Проведена апробация метода фазовой визуализации на примере волнового фронта, пространственно модулированного скрытым изображением; описан эксперимент по улучшению качества голографической реконструкции путем измерения и регистрации контролируемого сферического волнового фронта. Полученные результаты демонстрируют перспективность предложенного подхода для повышения разрешающей способности и стабильности голографических систем

Ключевые слова: Оптика, голография, измерение волнового фронта, компенсация аберраций

Стендовые доклады

С.12.1 Численное моделирование метода подавления интерференционных замираний в когерентных оптических рефлектометрах со спектральным мультиплексированием зондирующего сигнала

Т. З. Миниханов^{1,2}, Р. И. Хан^{1,3}, Г. Б. Сидельников¹, Т. В. Гриценко³, А. Б. Пнев³

¹Акционерное общество Научно-производственный центр «ЭЛВИС», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В работе представлена численная модель волоконно-оптического когерентного рефлектометра на базе рэлеевского рассеяния с подавлением интерференционных замираний на основе метода спектрального мультиплексирования зондирующего сигнала. Моделирование позволяет анализировать влияние замираний (зон слабой чувствительности к внешнему воздействию) и фазовых шумов лазера на возникновение ошибок при реконструкции фазы воздействия, проявляющихся в виде шумовых выбросов на рефлектограмме. Проверка эффективности предложенного подхода включает в себя разработку модели сенсора, ее экспериментальную верификацию и сравнение с базовой схемой фазочувствительного распределенного сенсора. Результаты демонстрируют, что спектральное мультиплексирование снижает уровень шумового фона и улучшает пороговую чувствительность к

внешним воздействиям. Полученные данные имеют практическое значение для повышения точности волоконно-оптических систем мониторинга, применяемых, например, в задачах распределённого измерения деформаций и диагностики критической инфраструктуры.

Ключевые слова: Волоконная оптика, Фазочувствительная рефлектометрия, Численное моделирование

С.12.2 Формирование голографических изображений в системах дополненной реальности на основе голограммного перископа

Т. А. Гататдинов¹, Е. Ю. Злоказов¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

В работе исследовался процесс формирования изображений компьютерно-синтезированными голограммами в когерентной оптической системе на основе фазового пространственно-временного модулятора света и голографического волноводного перископа. Были проведены эксперименты по оптическому восстановлению контурных и сплошных изображений с фазовых голограмм Френеля, также были проведены эксперименты по восстановлению 3D-сцен. Рассмотрены различные методы вывода голограмм на пространственно-временной модулятор света (ПВМС) и различные конфигурации оптической схемы: мультиплексный вывод голограмм, использование деспеклера, расположение плоскости голографического перископа под углом к плоскости ПВМС, а также их комбинация.

Ключевые слова: волноводная голография, фазовые голограммы, компьютерный синтез, голограммы Френеля

Секция 13

Новые прикладные оптические технологии

Устные доклады

13.1 Экспериментальные исследования погрешности стабилизации линии визирования оптико-электронных систем наблюдения (Приглашенный)

Г. Н. Маркушин¹, В. В. Коротаев², М. А. Чехов¹, А. Н. Чиванов¹, М. М. Симановский¹, В. А. Рыжова²

¹ АО ПО "УОМЗ" г. Екатеринбург

² Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

13.2 Рефрактометры с температурной компенсацией на основе межмодовых волоконно-оптических интерферометров (Приглашенный)

А. А. Маркварт, Л. Д. Завалишина, А. Э. Зарипов, Л. Б. Лиокумович, Н. А. Ушаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрены межмодовые интерферометры на основе составных волоконно-оптических SMS-структур, от англ. singlemode-multimode-singlemode, и их применение в качестве измерителей показателя преломления внешней среды. Приведена методика расчета спектральных характеристик интерферометров и их отклика на изменение показателя преломления и температуры внешней среды. Предложен подход учёта влияния температуры на результаты измерения показателя преломления внешней среды, заключающийся в анализе откликов различных интерференционных компонент, соответствующих различным парам волоконных мод, при помощи преобразования Фурье. Проведены экспериментальные исследования интерферометров, погруженных в водные растворы глицерина разных концентраций. Продемонстрирована возможность одновременного измерения концентрации глицерина в растворе и температуры раствора. Рассмотрены особенности применения дискретного преобразования Фурье и проанализированы погрешности измерений.

Ключевые слова: Межмодовый волоконный интерферометр, SMS, показатель преломления, спектральная интерферометрия, преобразование Фурье

13.3 Резонансная схема миниатюрного оптического магнитометра с использованием SPUN-волокна

А. А. Чувызгалов^{1,2}, В. А. Максименко¹, А. И. Ливашвили³, В. В. Криштоп^{1,2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

² ПАО Пермская научно производственная приборостроительная компания, г. Пермь, Россия

³ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия

В статье описывается резонансная схема миниатюрного оптического магнитометра с использованием SPUN-волокна и интегрированных четвертьволновых пластинок. Такое решение обеспечивает изменение состояния поляризации с линейной на циркулярную, что значительно повышает чувствительность прибора к слабым магнитным полям. Испытания макета магнитометра показали, что

использование круговой поляризации позволяет достичь чувствительности до 100 нТл. Конструкция отличается компактностью и устойчивостью к внешним шумам, что делает её пригодной для применения в медицине, геомагнитных исследованиях, для поиска полезных ископаемых, в высокоточных навигационных системах.

Ключевые слова: Оптический магнитометр, Резонансная схема, SPUN-волокно, Поляризация

13.4 Особенности применения спектральных систем контроля при изготовлении интерференционных фильтров для ИК диапазона (Приглашенный)

А. Н. Тропин

АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

Для исследования особенностей использования спектральных систем контроля при изготовлении инфракрасных интерференционных фильтров реализован подход, основанный на моделировании процесса вакуумного осаждения покрытий. С применением процедуры так называемого предпроизводственного анализа рассматриваются различные стратегии контроля осаждаемых слоев. На примере некоторых многослойных тонкопленочных структур продемонстрированы возможности указанного подхода. Развита в работе процедура для определения наиболее подходящей стратегии контроля позволяет получать воспроизводимые результаты в технологических процессах вакуумного осаждения оптических интерференционных покрытий. Рассмотрены имеющиеся ограничения и приведены результаты практического применения спектральных систем контроля при изготовлении прецизионных инфракрасных интерференционных фильтров.

Ключевые слова: интерференционный фильтр, вакуумное осаждение, многослойное тонкопленочное покрытие, спектральная система контроля

13.5 Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа состава газовой смеси

А. В. Шелаев¹, А. В. Барышев¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Спектроскопия комбинационного рассеяния находит применение в анализе состава газовых смесей. Одним из ключевых преимуществ метода является возможность детектирования двухатомных молекул (H_2 , O_2 и N_2), что важно для мониторинга и обеспечения безопасности в энергетике и атомной отрасли. Возбуждения комбинационного рассеяния осуществлялось лазером с длиной волны 445 нм и выходной мощностью 6 Вт. Такие параметры позволили обеспечить высокую чувствительность и точность измерений, вплоть до 0,01 % об., в полном диапазоне 0–100 % об. Исследовались две оптические конфигурации детектирования: с обратным сбором рассеянного излучения и в геометрии скрещенных пучков. Последняя продемонстрировала существенно лучшее соотношение сигнал-шум, что делает её более предпочтительной для практического применения.

Ключевые слова: Оптика, Спектроскопия, Комбинационное рассеяния, Газ

13.6 Оптические и не оптические методы диагностики и контроля нового поколения

А. П. Владимиров^{1,2}

¹ Институт машиноведения УрО РАН им. Э.С. Горкунова, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Целью доклада является сообщение об использовании нового оптического метода для определения деформаций газовых, жидких и твердых сред, и о начале разработки на основе полученных данных датчиков, методов и приборов контроля и диагностики нового поколения. Показано, что не регистрация в режиме реального времени многоциклового усталости современными методами контроля объясняется большой базой измерения порядка 1-100 мм, в то время как гигантские эффекты возникают на участках размером порядка 10 мкм. На основе выявленных механизмов усталости ряда материалов предложено разрабатывать оптические и неоптические датчики остаточного ресурса деталей нового поколения. Заявка должна содержать аннотацию из одного абзаца на 50–100 слов. Аннотация должна содержать не введение, а описание содержания статьи (кратко описывать цели, используемую методологию, полученные результаты и их значение), должна быть самодостаточной и не содержать ссылок на литературу. Ключевые слова должны включать 3–8 пунктов.

Ключевые слова: Динамика спеклов, Усталость, Разрушение, Остаточный ресурс

13.7 Опыт получения и применения в серийном оптическом производстве комбинированных оптических элементов на основе прецизионного реплицирования с использованием малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения

М. М. Ахметов¹, Л. В. Бордюжа², Н. А. Гурин³, С. В. Косковский¹, Е. Г. Лисова¹, Анатолий Васильевич Лукин¹, А. Н. Мельников¹, Н. Г. Мирханов¹, И. А. Могилюк¹, Д. Р. Нурмухаметов², И. В. Самойлов⁴, А. Ф. Скочилов¹, О. Б. Яковлев⁴

1 – Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия;

2 – Акционерное общество «Казанский оптико-механический завод», Казань, Россия;

3 – Акционерное общество «Новосибирский приборостроительный завод», Новосибирск, Россия;

4 – Акционерное общество «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова», Екатеринбург, Россия

В докладе представлены основные технологические операции и номенклатура расходных материалов для получения комбинированных оптических элементов (КОЭ). Приведены результаты комплексных ускоренных испытаний на сохраняемость и климатiku нескольких различных образцов КОЭ.

Показано, что по долговечности, механической прочности, устойчивости к воздействию ряда агрессивных сред и других негативных факторов КОЭ близки к своим чисто стеклянным аналогам, а их себестоимость многократно ниже. Обсуждаются первые результаты применения КОЭ в реальных оптико-электронных устройствах.

Ключевые слова: Комбинированный оптический элемент, Компонент, Асферическая поверхность, Прецизионное реплицирование, Малоусадочная полимерная композиция, Фотополимер, Мастер-матрица, Окуляр.

13.8 Оптоэлектронный осциллятор как ключевой компонент передовых сенсорных и инфокоммуникационных систем

Г. С. Воронков¹, И. В. Степанов¹, В. В. Иванов¹

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Рассматриваются особенности применения оптоэлектронных осцилляторов (ОЭО), выполненных с использованием технологий интегральной фотоники, как важного компонента передовых инфокоммуникационных и сенсорных систем. В области беспроводной связи ОЭО позволяют добиться существенного диапазона перестройки частоты СВЧ-колебаний, превосходя по этому параметру традиционные схемы на основе GaAs-транзисторов. При этом важной остается задача снижения шага перестройки частоты выходных колебаний ОЭО. Показано, что для этой цели можно использовать дополнительные управляемые линии задержки в кольце обратной связи ОЭО. В сенсорных системах

применение ОЭО, особенно при возможности реализации малого шага перестройки его выходной частоты, позволяет снизить уровень собственных шумов системы и повысить ее чувствительность.

Ключевые слова: Радиофотоника, Интегральная фотоника, Оптоэлектронный осциллятор, Сенсорная система

Секция 14

Нейросетевые технологии в фотонике

Устные доклады

14.1 Применение архитектуры типа трансформер для решения задачи детекции объектов в мультимодальных данных сенсоров беспилотных авто

А. В. Таламанова¹, Е. Ю. Злоказов¹,

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Данная работа посвящена решению задачи детекции объектов в данных лидара и камеры с помощью модели глубокого обучения типа трансформер. Приведен подробный обзор и систематический анализ существующих архитектур, выявляющий ключевые ограничения в обработке пространственно-временных корреляций между сенсорами. На основе проанализированных решений предложен ряд улучшений, разработаны архитектуры-кандидаты. Представлены и проанализированы результаты тестирования предложенных архитектур.

Ключевые слова: Беспилотные технологии, Детекция объектов, Архитектура трансформер, Лидар, Камера

14.2 Оперативный синтез компьютерных голограмм 3D-сцен с использованием нейронных сетей

Д.А. Рымов, Т.А. Гататдинов, А.В. Шифрина, Е.Ю. Злоказов, П. А. Черёмхин, Р. С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлен разработанный неитеративный нейросетевой метод синтеза фазовых компьютерных голограмм 3D-сцен. Для обучения нейронной сети использовался набор случайно сгенерированных простых объектов (кругов). Обученная нейросеть в несколько раз превосходит традиционный итеративный алгоритм по быстродействию, без потери качества. Результаты подтверждаются в ходе оценки качества изображений численно и оптически восстановленных из синтезированных голограмм.

Ключевые слова: Голография, Дифракционные оптические элементы, Нейронные сети, Машинное обучение

14.3 Набор процедурно генерируемых биологических клеток для обучения нейронных сетей в цифровой голографии

А. С. Свистунов, Д. А. Рымов, Р. С. Стариков., П. А. Черёмхин, Н. Н. Евтихийев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Мы предлагаем использовать набор данных, состоящий из процедурно сгенерированных биологических клеток двух типов, основанный на реальных изображениях клеток для обучения нейронных сетей (НС). Были проведены эксперименты по классификации клеток и реконструкции изображений с цифровых голограмм. Точность классификации была выше 99% как при использовании изображений клеток, так и их голограмм. Задача реконструкции изображений также была успешно решена. Таким образом, предложенный набор данных может применяться для обучения НС в таких областях как медицина и биология.

Ключевые слова: Цифровая голография, Наборы данных, Глубокое обучение, Нейронные сети, Биологические клетки, Реконструкция изображений, Компьютерная голография

14.4 Библиотека для моделирования и оптимизации систем дифракционной оптики, оптических вычислителей и дифракционных нейросетей с открытым исходным кодом

А. А. Щербаков, С. С. Чугунов, В. Д. Игошин, Д. И. Сахно, А. Ю. Кохановский
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе обсуждается современное состояние нейроморфных оптических вычислителей с акцентом на полностью оптические аналоги нейронных сетей. Будет представлена разработанная открытая полностью настраиваемая и расширяемая библиотека SVETIANNa, позволяющая моделировать и оптимизировать, в том числе на графических процессорах, как классические схемы с дифракционными элементами, так и дифракционные нейросети. На разнообразных примерах будут продемонстрированы возможности таких нейросетей, и показаны различные варианты применения библиотеки.

Ключевые слова: Дифракционные оптические элементы, дифракционные нейронные сети, нейроморфные вычислители, оптические вычисления

14.5 Решение обратной задачи дифракции для пространственных модуляторов света с учетом структуры ячейки с помощью машинного обучения

С. С. Чугунов, С. И. Спиридонов, А. А. Щербаков
Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Разработана нейронная сеть, предсказывающая функцию пропускания фазовых пространственных модуляторов света, учитывающую взаимодействие между пикселями. Фурье-модальным методом рассчитывается фазовый набег центрального пикселя с учетом влияния восьми соседних. С помощью этого метода сгенерирован набор данных, содержащий фазовые набег для различных заданных состояний двумерной структуры. Структура состоит из девяти пикселей модулятора, расположенных в форме квадрата. Обученная модель позволяет за короткое время предсказывать функцию пропускания для модуляторов, состоящих из большого числа пикселей. Модель применена для поиска численного решения прямой задачи дифракции и задачи формирования пучка заданной формы.

Ключевые слова: Оптика, Пространственные модуляторы света, Машинное обучение, Нейронные сети, Эффект окаймляющего поля

14.6 Оптическая классификация изображений на различных длинах волн с использованием спектральных дифракционных нейронных сетей

Г. А. Мотз^{1, 2}, Д. В. Сошников^{1, 2}, Л. Л. Досколович^{1, 2}, Е. В. Бызов^{1, 2}, Е. А. Безус^{1, 2}, Д. А. Быков^{1, 2},
Н. В. Головастик^{1, 2}

¹ *Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара*

² *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия*

Предложен метод расчета дифракционной нейронной сети (ДНС) для решения различных задач классификации изображений на различных длинах волн. В рамках метода задача расчета ДНС формулируется как задача минимизации функционала, зависящего от функций высот микрорельефа дифракционных оптических элементов, образующих ДНС, и представляющего ошибку решения

заданных задач классификации на расчетных длинах волн. Для производных функционала получены явные выражения, и на этой основе сформулирован градиентный метод расчета дифракционной нейронной сети. С использованием предложенного градиентного метода рассчитаны ДНС для решения трех различных задач классификации изображений на трех длинах волн. Представленные результаты моделирования работы рассчитанных ДНС демонстрируют хорошие рабочие характеристики предложенного метода.

Ключевые слова: Задача классификации изображений, Дифракционная нейронная сеть, Каскадный дифракционный оптический элемент, Дифракционный микрорельеф, Скалярная теория дифракции, Оптимизация, Градиентный метод

Архитектура программы

Архитектура ХОЛОЭКСПО 2025

Дата, Время	Зал "Урал 1+2+3"	Зал "Ассель"	Зал "Урал 3"/ Зал Москва
8 сентября, понедельник			
10:00–13:00	Речная прогулка по реке Белой (Экскурсия №1)		
15:00–18:00	Регистрация участников		
18:00–20:00	Квиз (интеллектуальная викторина)		
9 сентября, вторник			
08:30–18:00	Регистрация участников		
09:00–09:30	Открытие конференции		
9:30–11:00	Пленарное заседание (Часть 1)		
11:00–11:30	Кофе-брейк		
11:30–13:00	Пленарное заседание (Часть 1)		
13:00–14:00	Обед		
14:00–15:45	Секция 1 (часть 1)	Секция 7 (часть 1)	Демозона
15:45–16:15	Кофе-брейк		
16:15–18:00	Секция 1 (часть 2) + Секция 12	Секция 7 (часть 2)	Демозона
18:00–18:30	Общее фото участников		
18:30–22:00	Приветственный коктейль в ресторане отеля REKA		
10 сентября, среда			
09:00–18:00	Регистрация участников		
9:00–11:00	Пленарное заседание (Часть 2)		
11:00–11:30	Кофе-брейк		
11:30–13:15	Секция 4	Секция 9	Демозона
13:15–14:15	Обед		
14:15–16:30	Секция 5	Секция 2	Демозона
16:30–17:00	Кофе-брейк		
17:00–18:30	Секция 3	Секция 14	Демозона
18:30–19:30			Стендовые доклады (з. Москва)
11 сентября, четверг			
09:00–13:00	Регистрация участников		
09:00–11:00	Секция 6	Секция 8	Демозона
10:45–11:15	Кофебрейк		
11:15–12:45	Секция 10 (часть1)	Секция 11 (часть 1)	Демозона
12:45–13:45	Обед		
13:45–15:45	Секция 13	Секция 11 (часть 2)	Демозона
15:45–16:15	Кофебрейк		
16:15–17:45	Секция 10 (часть2)	Секция 11 (часть 3)	Демозона
17:45–18:00	Закрытие конференции		
18:45–22:30	Торжественный ужин в ГКЗ Башкортостан (встреча у отеля)		
12 сентября, пятница			
09:00–18:00	Экскурсия в Национальный музей Республики Башкортостан / БГХМ имени М.В. Нестерова		